



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN PENYIMPAN ENERGI  
MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DENGAN  
DYNAMIC THERMAL LINE RATING**

**Agung Rochmadi**  
**NRP 07111440000137**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.**  
**Vita Lystianingrum B.P. S.T. M.Sc. Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO**  
**Fakultas Teknologi Elektro**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2018**



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN PENYIMPAN ENERGI  
MEMPERTIMBANGKAN BATAS KEAMANAN DENGAN  
DYNAMIC THERMAL LINE RATING**

Agung Rochmadi  
NRP 07111440000137

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Vita Lystianingrum B.P. S.T. M.Sc. Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



## **FINAL PROJECT - TE 141599**

### **Security Constrained Optimum Power Flow (SCOPF) with Energy Storage with Dynamic Thermal Line Rating**

Agung Rochmadi  
NRP 07111440000137

#### **Supervisors**

Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
Vita Lystianingrum B.P. S.T. M.Sc. Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2018



**ALIRAN DAYA OPTIMAL DENGAN PENYIMPAN  
ENERGI MEMPERTIMBANGKAN BATAS  
KEAMANAN DENGAN DYNAMIC  
THERMAL LINE RATING**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Eng. Rony Seto W., ST., MT.**  
**NIP. 197411292000121001**

**Dosen Pembimbing II**

  
16/7/2018

**Vita L. B. P., ST., M.Sc., Ph.D.**  
**NIP. 198208292006042001**



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan "**Aliran Daya Optimal dengan Penyimpan Energi Mempertimbangkan Batas Keamanan dengan *Dynamic Thermal Line Rating***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 4 Juni 2018



Agung Rochmadi  
NRP 07111440000137

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**Aliran Daya Optimal dengan Penyimpan Energi**  
**Mempertimbangkan Batas Keamanan dengan *Dynamic Thermal***  
***Line Rating***

Nama Mahasiswa	: Agung Rochmadi
NRP	: 07111440000137
Pembimbing I	: Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.
NIP	: 197411292000121001
Pembimbing II	: Vita Lystianingrum B.P. S.T.,M.Sc.,Ph.D
NIP	: 198208292006042001

**Abstrak:**

Dalam upaya memenuhi permintaan energi listrik yang berubah-ubah, penting untuk melakukan penjadwalan pembangkit dengan benar. Dalam melakukan penjadwalan pembangkit, dibutuhkan analisis aliran daya optimal untuk mendapatkan biaya yang minimal dalam memenuhi kebutuhan listrik. Sistem tenaga listrik saat ini dikembangkan dengan penambahan pembangkit pada jaringan yang disebut *Distributed Generator* (DG). Dalam perkembangannya, pada DG dipasang penyimpan energi untuk memaksimalkan kinerja dari DG. Dengan adanya penyimpan energi pada sistem maka penjadwalan sistem tenaga listrik akan berubah. Hal ini juga berpengaruh pada *Security Constrained Optimum Power Flow* (SCOPF) atau aliran daya optimal dengan batas keamanan yang merupakan perencanaan penjadwalan sistem tenaga listrik dengan diberi batas keamanan agar dapat mengatasi beban yang dinamis. Tugas akhir ini meneliti tentang SCOPF yang terdapat penyimpan energi dengan menggunakan *dynamic line rating*. *Dynamic Line Rating* merupakan metode yang digunakan untuk meningkatkan kapasitas dari saluran. Dengan adanya Aliran daya optimal dengan penyimpan energi mempertimbangkan batas keamanan dan penyimpan energi ini dapat meminimalkan biaya operasi hingga 1,5% dalam kebutuhan pemenuhan energi listrik.

**Kata kunci:** ACOPE, dynamic line rating, energy storage, SCOPF.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **SECURITY CONSTRAINED OPTIMUM POWER FLOW WITH ENERGY STORAGE WITH DYNAMIC THERMAL LINE RATING**

Student Name : Agung Rochmadi  
NRP : 07111440000137  
Supervisor I : Dr. Eng. Rony Seto Wibowo, S.T., M.T.  
NIP : 197411292000121001  
Supervisor II : Vita Lystianingrum B.P. S.T.,M.Sc.,Ph.D  
NIP : 198208292006042001

## **Abstract:**

In an effort to meet the fluctuating electrical energy demand, it is important to schedule the plant properly. In arranging schedule of generator, an optimal power flow analysis is required to obtain minimal cost in meeting the electricity needs. The power system is currently being developed with the addition of a generator to a network called the Distributed Generator (DG). In its development, energy storage installed on DG to maximize the performance of DG. With the energy storage in the system then the scheduling of the electric power system will change. This also affects Security Constrained Optimum Power Flow (SCOPF) - or optimum power flow with the safety limit-, which is the scheduling plan of electric power system with security limits in order to overcome dynamic loads. This final project examines the SCOPF with energy storage by using a dynamic line rating. Dynamic Line Rating is a method used to increase the capacity of channels. By the existence of this optimum power flow with energy storage which considers the safety and energy storage limit, it can minimize operating costs by up to 1.5% in the needs of electrical energy fulfillment.

.

**Key Word: ACOPF, dynamic line rating, energy storage, SCOPF.**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Aliran Daya Optimal dengan Penyimpan Energi Mempertimbangkan Batas Keamanan dengan *Dynamic Thermal Line Rating***”.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Rony Seto dan ibu Vita selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan hingga penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikat manfaat untuk kedepannya.

Surabaya, 4 Juni 2018

Agung Rochmadi

NRP 07111440000137

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	Error! Bookmark not defined.
TUGAS AKHIR.....	Error! Bookmark not defined.
KATA PENGANTAR.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN .....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Permasalahan .....	2
1.3    Tujuan .....	3
1.4    Batasan Masalah .....	3
1.5    Metodologi .....	4
1.6    Sistematika Penulisan.....	5
1.7    Relevansi .....	5
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA .....	7
2.1    Sistem Tenaga Listrik .....	7
2.1.1    Keamanan Pada Sistem Tenaga Listrik.....	8
2.2    Optimal Power Flow Arus Bolak Balik (AC-OPF) .....	9
2.3    DOPF (Dynamic Optimal Power Flow).....	11
2.4    Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dengan Batas Keamanan Sistem .....	12
2.5    Penyimpan Energi .....	14
2.6    Dynamic Line Rating dengan Heat Balance Equation.....	15
2.7    Optimal Power Flow Mempertimbangkan Penyimpan energi dan Dynamic Line Rating.....	17

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	19
3.1.    Algoritma .....	19
3.2.    Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem [11] .....	21
3.2.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF ( <i>Dynamic Optimal Power Flow</i> ) .....	23
3.2.2 AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming .....	25
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	33
4.1    Analisis Kontingensi.....	33
4.1.1 Analisis Kontingensi IEEE Sistem 9 Bus .....	33
4.1.2 Analisis Kontingensi IEEE Sistem 14 Bus .....	34
4.2    Simulasi IEEE Sistem 9 Bus .....	35
4.2.1 Pengujian Tahap 1 .....	36
4.2.2 Pengujian Tahap 2 .....	38
4.2.3 Pengujian Tahap 3 .....	44
4.2.4 Pengujian Tahap 4 .....	46
4.3    Simulasi IEEE Sistem 14 Bus .....	49
4.3.1 Pengujian Pertama .....	54
4.3.2 Pengujian Kedua.....	57
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN .....	65
5.1    Kesimpulan .....	65
5.2    Saran .....	65
DAFTAR PUSTAKA .....	67
LAMPIRAN .....	69
BIODATA PENULIS .....	77





## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Ilustrasi sistem tenaga listrik .....	7
Gambar 2.2	Sistem kondisi normal.....	8
Gambar 2.3	Sistem kondisi gangguan.....	8
Gambar 3.1	Flowchart alur sistem.....	20
Gambar 4.1	Sistem IEEE 9 bus .....	33
Gambar 4.2	Harga pada saat normal dan kontingensi .....	42
Gambar 4.3	Profil beban 24 jam.....	44
Gambar 4.4	Daya pengeluaran penyimpan energi (1) tiap jam.....	44
Gambar 4.5	Daya pengeluaran penyimpan energi (2) tiap jam.....	45
Gambar 4.6	Daya pengeluaran penyimpan energi (3) tiap jam.....	45
Gambar 4.7	SOC penyimpan energi pada tiap kondisi .....	45
Gambar 4.8	Kapasitas saluran pada bus 8 ke bus 2 untuk saluran statis dan dinamis pada setiap jam .....	47
Gambar 4.9	Arus pada saluran dari bus 8 ke bus 2 untuk saluran statis dan dinamis pada setiap jam .....	49
Gambar 4.10	case IEEE 14 bus dengan peletakan 2 baterai <i>energy storage</i> .....	51
Gambar 4.11	Profil beban 24 jam.....	54
Gambar 4.12	Daya output generator kondisi 1 dan kondisi 3 .....	54
Gambar 4.13	Daya output generator kondisi 2 dan kondisi 4 .....	55
Gambar 4.14	<i>Charging</i> dan <i>discharging</i> baterai 1 .....	55
Gambar 4.15	<i>Charging</i> dan <i>discharging</i> baterai 2 .....	55
Gambar 4.16	Biaya pembangkitan pada setiap jam di kondisi 1-4 .....	56
Gambar 4.17	Daya output generator pada kondisi 1 dan kondisi 3 .....	58
Gambar 4.18	Daya output generator pada kondisi 2 dan kondisi 4 .....	58
Gambar 4.19	Daya output generator pada kondisi 3 dan kondisi 5 .....	59
Gambar 4.20	Daya output generator pada kondisi 4 dan kondisi 6 .....	59
Gambar 4.21	Kapasitas saluran 1-2 statis dan dinamis pada setiap jam.....	60
Gambar 4.22	Arus saluran 1-2 setiap jam pada kondisi 3 dan 5 .....	60
Gambar 4.23	Biaya operasi setiap jam pada kondisi 1,3 dan 5 .....	60
Gambar 4.24	Biaya operasi setia jam pada kondisi 2,4,6 .....	61
Gambar 4.25	SOC pada baterai 1 .....	61
Gambar 4.26	SOC pada baterai 2 .....	61

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Pengaruh kontingensi pada sistem IEEE 9 bus .....	34
Tabel 4.2	Pengaruh kontingensi pada sistem IEEE 14 bus .....	34
Tabel 4.3	Data pembangkit modifikasi IEEE sistem 9 bus .....	35
Tabel 4.4	Data saluran modifikasi IEEE sistem 9 bus .....	36
Tabel 4.5	Data beban modifikasi sistem IEEE 9 bus .....	36
Tabel 4.6	Kondisi dua level beban pada jam pertama dan kedua .....	37
Tabel 4.7	Hasil Sudut dan tegangan bus, daya aktif dan reaktif generator, biaya pembangkitan pengujian tahap 1 .....	37
Tabel 4.8	Hasil Sudut dan tegangan bus, daya aktif dan reaktif generator serta biaya pembangkitan pada pengujian tahap 1 (lanjutan) .....	38
Tabel 4.9	Kondisi beban .....	39
Tabel 4.10	Kondisi normal tanpa <i>ramprate</i> .....	39
Tabel 4.11	Selisih daya output generator setiap jam pada kondisi tanpa <i>ramprate</i> .....	39
Tabel 4.12	Kondisi normal dengan <i>ramprate</i> .....	39
Tabel 4.13	Selisih daya output generator setiap jam pada kondisi dengan <i>ramprate</i> .....	40
Tabel 4.14	Pengujian selama 6 jam .....	40
Tabel 4.15	Kondisi normal .....	41
Tabel 4.16	Kondisi kontingensi .....	41
Tabel 4.17	Selisih kondisi kontingensi dan normal pada setiap jam ...	41
Tabel 4.18	Kondisi normal pada jam ke-6 .....	42
Tabel 4.19	Kondisi kontingensi pada jam ke-6 .....	43
Tabel 4.20	Data baterai pada tiga kondisi .....	44
Tabel 4.21	Kapasitas saluran dinamis dari case IEEE 9 bus .....	47
Tabel 4.22	Kapasitas saluran statis dan dinamis pada setiap jam .....	48
Tabel 4.23	Total biaya pembangkitan pada rating saluran statis dan dinamis pada setiap jam .....	48
Tabel 4.24	Data pembangkit pada IEEE case 14 bus .....	50
Tabel 4.25	Data baterai pada IEEE case 14 bus .....	50
Tabel 4.26	Data kapasitas saluran pada IEEE case 14 bus .....	51
Tabel 4.27	Data kapasitas saluran pada IEEE case 14 bus (lanjutan) .	52
Tabel 4.28	Data beban pada IEEE case 14 bus .....	52
Tabel 4.29	Data rating saluran dinamis .....	53

Tabel 4.30	Data bban 12 jam .....	53
Tabel 4.31	Total biaya pembangkitan pada kondisi 1-4.....	56
Tabel 4.32	Daya output generator dan <i>energy storage</i> pada jam ke-10.....	58
Tabel 4.33	Arus saluran 1-2 pada kondisi 1-4 jam ke-10.....	59
Tabel 4.34	Arus saluran 1-2 pada kondisi 3-6 jam ke-10.....	59
Tabel 4.35	Total biaya pembangkitan selama 12 jam .....	62

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Listrik sudah menjadi kebutuhan primer pada saat ini. Kebutuhan akan energi listrik semakin lama semakin meningkat pada setiap tahunnya mengikuti banyaknya permintaan listrik oleh masyarakat . Dalam upaya memenuhi permintaan energi listrik yang berubah-ubah, penting untuk melakukan penjadwalan pembangkit dengan benar. Penyaluran energi listrik tidak terlepas pada saluran transmisi dan juga saluran distribusi. Maka dari itu hal tersebut harus diperhatikan agar tidak terjadinya overload pada tiap saluran. Dalam perencanaan operasi sistem tenaga listrik perlu memperhatikan beberapa aspek antara lain economy, quality, dan security. Economy artinya dalam operasi sistem tenaga listrik dapat menghasilkan daya yang sebesar-besarnya dengan biaya pembangkitan yang serendah-rendahnya. Quality artinya pembangkitan harus memiliki kualitas yang tinggi sehingga dapat menyuplai beban dengan baik dan dapat meminimalisir adanya gangguan. Security artinya kemampuan yang dimiliki pada sistem tenaga listrik dalam menghadapi gangguan, sehingga tidak merugikan konsumen[1].

Optimal Power Flow (OPF) atau biasa disebut aliran daya optimal merupakan perencanaan operasi sistem tenaga listrik yang meminimalkan biaya pembangkitan generator dalam upaya memenuhi kebutuhan pelanggan. Aliran daya Optimal ini mengatur pembebanan pada pembangkit yang terinterkoneksi pada suatu sistem kelistrikan. Aliran daya optimal pada sistem konvensional belum mampu menyelesaikan permasalahan-permasalahan pembebanan dinamis yang melebihi dari *ramprate* generator, dikarenakan pada sistem konvensional masih belum mampu mengatasi permasalahan keadaan beban dinamis yang terjadi pada sistem kelistrikan[2].

Kapasitas transfer daya pada saluran transmisi merupakan constraint penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Constraint ini memiliki peran penting dalam pengelolaan sistem tenaga yang aman dan ekonomis. Dengan memantau keadaan termal saluran transmisi dan mempertimbangkan kondisi meteorologi, maka rating saluran yang disesuaikan secara dinamis memungkinkan kapasitas transmisi yang lebih tinggi[3].

Pada perkembangan sistem tenaga listrik saat ini banyak menggunakan pembangkit dengan energi baru dan terbarukan (EBT) dalam upaya meningkatkan kebutuhan listrik. Pembangkit dengan menggunakan energi baru dan terbarukan ini terhubung pada jaringan distribusi sehingga disebut dengan istilah DG (Distributed Generator). DG (Distributed Generator) menggunakan energi primer sebagai bahan bakar. Sehingga, pada pengoperasian DG (Distributed Generator) tidak dapat beroperasi secara penuh dikarenakan kondisi energi primer yang selalu berubah ubah setiap saat. Maka dari itu digunakan penyimpan energi yang berupa baterai pada DG (Distributed Generator) untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan. Sehingga Energi listrik yang tersimpan pada DG (Distributed Generator) ini dapat digunakan setiap saat pada perencanaan sistem tenaga listrik[4].

Sistem tenaga listrik pada umumnya beroperasi pada keadaan normal dan keadaan kontingensi. Kontingensi merupakan suatu kejadian yang disebabkan adanya gangguan pada sistem tenaga listrik ataupun kegagalan pada saat operasi oleh satu atau lebih pembangkit atau pada saluran transmisi. Kontingensi dapat mengganggu batas keamanan sistem, seperti ramp rate generator dan karakteristik saluran. Untuk menghindari gangguan pada batas keamanan yang memperhatikan panas dari konduktor kabel saluran transmisi serta kondisi cuaca yang ada, maka perlu dilakukan analisis aliran daya optimal dengan penyimpan energi mempertimbangkan batas keamanan dengan Dynamic Thermal Line Rating.

## **1.2 Permasalahan**

Berdasarkan dari latar belakang tentang perencanaan operasi suatu sistem tenaga listrik tentang permasalahan perencanaan operasi pembangkit yang optimal dalam memenuhi kebutuhan beban. Sehingga dibutuhkan perencanaan operasi sistem tenaga listrik yang handal dan dapat memenuhi kebutuhan beban, agar mendapatkan perencanaan operasi sistem tenaga listrik yang handal, ekonomis dan aman. Perencanaan operasi sistem pembangkit juga perlu memperhatikan batasan-batasan yang ada, *ramp rate* dari pembangkit, kapasitas dari saluran dan juga keadaan kontingensi dari suatu sistem. Selain itu, dalam perencanaan operasi sistem pembangkit perlu untuk mengetahui adanya dampak yang diberikan oleh *energy storage* (penyimpan energi) yang terdistribusi dalam saluran distribusi.

### 1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah untuk membuat perencanaan operasi sistem tenaga listrik dengan keandalan tinggi, ekonomis serta sistem yang aman dan dapat memenuhi batasan operasi dari sistem tenaga listrik. Seperti : pembebanan, kapasitas pada saluran, *ramp rate* generator dan kontingensi pada saluran. Penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui pengaruh adanya *energy storage* pada perencanaan operasi sistem tenaga listrik.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- a) *Ramp up* dan *ramp down* pembangkit dianggap sama.
- b) Semua pembangkit diasumsikan selalu beroperasi.
- c) Semua saluran diasumsikan *double circuit*.
- d) Penyimpan energi yang diperhitungkan adalah baterai.
- e) Parameter penyimpan energi yang diperlihatkan adalah kapasitas dengan satuan Wh.
- f) Rugi umur penyimpan energi diabaikan.
- g) Biaya maintenance dan investasi penyimpan energi diabaikan.
- h) Sumber dalam pengisian penyimpan energi dianggap selalu ada.
- i) Tidak dilakukan dioptimisasi pada peletakan dan *sizing* dari penyimpan energi.
- j) Efisiensi masing-masing pembangkit dan penyimpan energi dianggap 100%.
- k) Data kondisi meteorologi berdasarkan sumber referensi
- l) Rating saluran proporsional terhadap *dynamic line rating*
- m) Sistem yang dipakai adalah sistem IEEE 9 bus dan 14 bus.
- n) Metode yang dipakai untuk menyelesaikan permasalahan adalah *Sequential Quadratic Programming*.
- o) Simulasi dilakukan dengan Matpower 3.2 pada Matlab R2014a.

## 1.5 Metodologi

Metodologi yang akan digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### 1. Studi Pustaka

Studi pustaka yang dilakukan yaitu mengenai Sistem tenaga listrik, AC power flow, karakteristik penyimpanan energi, karakteristik saluran, *ramp rate* pembangkit, OPF, SCOPF, DOPF, *dynamic line rating*, dan penggunaan *Sequential Quadratic Programming* pada Matpower Matlab untuk perhitungan SCOPF.

### 2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini akan dilakukan pengumpulan data untuk sistem yang akan digunakan, yaitu sistem IEEE 9 bus dan 14 bus. Data-data ini berupa data generator, data saluran, dan data beban. Data generator terdiri dari data *cost function*, kemampuan pembangkitan maksimum dan minimum generator, dan *ramp rate* untuk masing-masing generator. Data saluran terdiri dari data impedansi saluran dan kapasitas saluran.

### 3. Pembuatan M-file

Penerapan SCOPF dengan penyimpanan energi menggunakan *Quadratic Programming* pada Matpower Matlab dengan pertimbangan batas keamanan dengan *Dynamic Thermal Line Rating*.

### 4. Simulasi dan Analisis

Simulasi akan dilakukan dengan empat kondisi yang berbeda. Kondisi pertama tanpa menyertakan batasan apapun. Kondisi kedua menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, dan kontingensi. Kondisi ketiga menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, kontingensi, dan pengaruh penyimpanan energi. Kondisi keempat menyertakan batasan kapasitas saluran, *ramp rate* pembangkit, kontingensi, pengaruh penyimpanan energi, dan pengaruh *dynamic thermal line rating* terhadap optimasi sistem. Keempat kondisi ini akan divalidasi menggunakan sistem IEEE 9 bus yang kemudian akan digunakan untuk menganalisis sistem IEEE 14 bus.

### 5. Pembuatan Laporan

Dari hasil analisis data yang telah dilakukan akan ditarik kesimpulan tentang SCOPF pada sistem IEEE 14 bus dengan membandingkan kasus yang dilakukan dan dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir.



## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : PENDAHULUAN

Bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari Tugas Akhir.

Bab 2 : KAJIAN PUSTAKA

Bab ini membahas tentang dasar teori yang dipakai dalam penyusunan Tugas Akhir ini. Dasar teori ini berupa penjelasan tentang sistem tenaga listrik, SCOPF, ACOPF, DOPF, penyimpanan energi, dan *dynamic line rating*.

Bab 3 : METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang penerapan *sequential quadratic programming* untuk penerapan analisis aliran daya optimal dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan dengan *dynamic thermal line rating*.

Bab 4 : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab ini membahas hasil dan analisis simulasi aliran daya optimal dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan dengan *dynamic thermal line rating*.

Bab 5 : PENUTUP

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari permasalahan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

## **1.7 Relevansi**

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat memberikan manfaat terhadap perkembangan system tenaga khususnya untuk permasalahan aliran daya optimal dengan penyimpanan energi yang terdistribusi pada sistem.
2. Dapat menjadi referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya dengan topik serupa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 2

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik empat bagian penting yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi dan beban. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.



**Gambar 2.1** Ilustrasi Sistem Tenaga Listrik

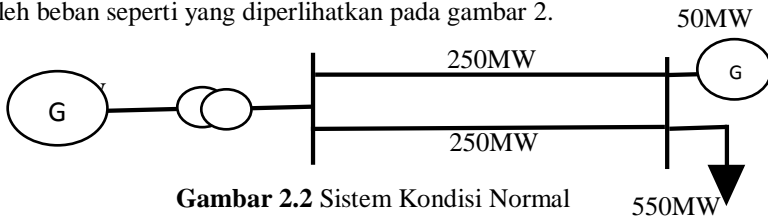
Pada gambar 1 merupakan ilustrasi sederhana dari suatu sistem tenaga listrik dimana dibagi menjadi tiga bagian yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Pembangkitan bertujuan untuk menghasilkan daya listrik dalam memenuhi kebutuhan pelanggan. Dalam suatu pembangkitan harus memperhatikan besar daya yang dapat dibangkitkan dan total biaya operasi tersebut. Hal itu dilakukan agar dapat memperoleh biaya operasi pembangkit yang minimal dengan menghasilkan daya yang optimal. Setelah daya dibangkitkan, maka perlu adanya media untuk mengirimkan daya listrik tersebut kepada pelanggan. Saluran transmisi berfungsi untuk mengirimkan daya yang dihasilkan pembangkit kepada pelanggan dimana biasanya pembangkit listrik berada jauh dari pelanggan. Dalam pengirimannya, daya yang dikirimkan pasti mengalami losses hal ini dikarenakan dengan jarak dari saluran transmisi. Semakin jauh saluran transmisi semakin pula besar losses yang diberikan. Setelah itu daerah distribusi dimana pada daerah ini merupakan penyebaran daya listrik ke pelanggan. Pada saat ini, banyak daerah distribusi yang terinterkoneksi dengan DG (*Distributed Generator*). Dengan adanya interkoneksi DG ini membuat daya yang dikirimkan ke pelanggan lebih efisien dikarenakan letak DG dekat dengan beban atau terdistribusi langsung pada daerah distribusi.

Suatu sistem tenaga listrik merupakan satu kesatuan dari tiga hal yang telah disebutkan diatas, yaitu pembangkit, transmisi dan distribusi[1]. Dimana operasi sistem tenaga listrik dikatakan baik dan optimal jika dapat memenuhi tiga kriteria yaitu, *quality* atau kualitas

dimana suatu sistem tenaga listrik harus memenuhi kualitas yang baik dalam memenuhi kebutuhan pelanggan. *Economy* atau ekonomis dimana operasi sistem tenaga listrik dapat menghasilkan energi listrik dengan daya yang besar dan biaya yang relative murah sehingga dapat terjangkau oleh pelanggan, dan *security* atau keamanan artinya kemampuan yang dimiliki pada sistem tenaga listrik dalam menghadapi gangguan, sehingga tidak merugikan pelanggan[5].

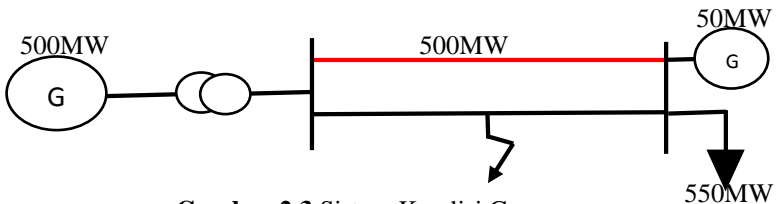
### 2.1.1 Keamanan Pada Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya sistem tenaga listrik memiliki dua kondisi, pada saat kondisi normal dan pada saat kondisi gangguan. Pada saat kondisi normal daya yang dibangkitkan oleh pembangkit dapat diterima semuanya oleh beban seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.



**Gambar 2.2** Sistem Kondisi Normal

Pada Gambar 2.2 diperlihatkan bagaimana kondisi sistem kelistrikan pada kondisi normal. Daya yang dibangkitkan dapat memenuhi permintaan beban dan saluran transmisi dapat bekerja secara optimal dalam mengirimkan daya listrik. Pada saat terjadi gangguan pada salah satu feeder, hal ini dapat membuat sistem menjadi terganggu seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.



**Gambar 2.3** Sistem Kondisi Gangguan

Pada operasi sistem tenaga listrik yang bertujuan untuk meminimalkan biaya operasi. Operasi sistem tenaga listrik juga harus memperhatikan keamanan sistem (*system security*). Yang dimaksud keamanan pada sistem tenaga listrik yaitu sistem tenaga listrik tetap

mampu memenuhi kebutuhan beban saat terjadi gangguan tanpa melanggar atau melebihi batasan operasi yang ditentukan misalnya kapasitas yang ada pada generator dan saluran transmisi.

Pada sistem tenaga listrik permasalahan yang sering terjadi yaitu terdapat saluran transmisi yang mengalami pembebanan lebih seperti yang terlihat pada gambar 3. Pembebanan yang berlebihan tersebut akan menyebabkan jatuh tegangan pada daerah tersebut dan berpengaruh pada daerah yang lain sehingga menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik. Salah satu cara untuk mengatasinya dapat dilakukan dengan *Re-dispatch* pembebanan pembangkit agar menjaga keamanan system supaya tidak terjadi *overload* pada saluran transmisi sehingga jatuh tegangan yang berlebihan dapat diatasi[6].

Pengoperasian sistem tenaga harus dilakukan dengan aman baik dalam keadaan normal maupun kontingensi. Kontingensi adalah keadaan dimana pembangkit atau saluran mengalami gangguan ataupun kondisi yang disebabkan adanya kegagalan dari pembangkit atau saluran baik satu unit atau lebih. Untuk menjaga keandalan sistem tenaga listrik maka diperlukan perencanaan yang menggunakan analisis kontingensi. Karena kegagalan yang paling sering terjadi pada kelistrikan adalah saluran transmisi maka analisis kontingensi dilakukan dengan mensimulasikan gangguan pada salah satu saluran atau lebih kemudian dianalisis pengaruhnya terhadap keamanan sistem dan biaya operasinya. Program yang dapat melakukan pengamanan di bawah keadaan normal dan kontingensi disebut sebagai aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem atau *security constrained optimal power flow*.

## **2.2 Optimal Power Flow Arus Bolak Balik (AC-OPF)**

Optimum Power Flow (OPF) atau aliran daya optimal merupakan metode pengembangan dari Economic Dispatch dimana ditambahkan tentang analisis perhitungan aliran daya[2]. Hasil yang didapatkan dari OPF berupa pembebanan pada pembangkit dimana memperhatikan aliran daya dengan total biaya minimal pada suatu sistem tenaga listrik. Pada analisis aliran daya optimal dibagi menjadi dua kondisi yaitu DC-OPF dan AC-OPF. Analisis aliran daya optimal dengan menggunakan sumber DC (DC-OPF) merupakan analisis yang digunakan tanpa mempertimbangkan daya reaktif. Sedangkan AC-OPF mempertimbangkan adanya daya reaktif pada sistem tenaga listrik. Sehingga analisis aliran daya optimal arus bolak balik menjadi lebih rumit dan lebih menggambarkan kondisi sistem tenaga listrik secara nyata[7].

Fungsi dari biaya pembangkitan merupakan fungsi objektif yang dapat dituliskan :

$$F_i(P_i) = a_i P_{i2} + b_i P_i + c_i \quad (2.1)$$

dimana:

$F_i$  = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i (Rp)

$P_{gi}$  = Daya output dari pembangkit ke-i (MW)

$a_i, b_i, c_i$  = koefisien biaya pembangkitan ke-i

Pada persamaan (1) biaya total produksi dari suatu pembangkit ( $F_i$ ) merupakan penjumlahan dari daya yang dibangkitkan dikalikan dengan koefisien masing-masing[2].

Pada penyelesaian permasalahan dalam analisis aliran daya optimal terdapat dua batasan secara umum yaitu *equality constraint* dan *inequality constraint*. *Equality constraint* pada aliran daya optimal merupakan persamaan keseimbangan daya aktif dan daya reaktif pada tiap bus sistem yang harus terpenuhi. *Inequality constraint* merupakan batasan pertidaksamaan yang digunakan untuk keamanan sistem. Batasan yang digunakan meliputi pembangkitan daya pada generator, aliran daya pada kapasitas saluran, dan *ramp rate* generator[2].

*Equality constraint* dalam aliran daya optimal memiliki persamaan sebagai berikut :

$$P_i - jQ_i = (P_{gi} - P_{di}) + j(Q_{gi} - Q_{di}) = V_i^* (\sum_{j=1}^n V_j Y_{ij}) \quad (2.2)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.3)$$

Sehingga :

$$P_i = P_{gi} - P_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (2.4)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (2.5)$$

Dimana  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  menyatakan jumlah dari bus.  $P_i$  dan  $Q_i$  merupakan input (masukan) dari daya aktif dan daya reaktif di bus i.  $P_{gi}$  dan  $Q_{gi}$  menyatakan daya aktif dan daya reaktif generator di bus i.  $P_{di}$  dan  $Q_{di}$  menyatakan daya aktif dan daya reaktif beban di bus i.

Sedangkan pada persamaan untuk *inequality constraint* dalam aliran daya optimal dapat dituliskan :

Batasan pembangkit :

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.6)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{di} \leq Q_{gi}^{max} \quad i = 1, 2, \dots, ng \quad (2.7)$$

Dimana  $P_{gi}^{min}$  dan  $Q_{gi}^{min}$  menyatakan batas minimum generator, ng adalah jumlah generator sedangkan  $P_{gi}^{max}$  dan  $Q_{gi}^{max}$  menyatakan batasan maksimum generator.

Batasan tegangan :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.8)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, nb \quad (2.9)$$

Dimana  $V_i$  dan  $\theta_i$  adalah *magnitude* tegangan dan sudut fasa tegangan pada bus I, sedangkan nb adalah jumlah bus. *Magnitude* tegangan dan sudut fasa tidak boleh melebihi batas minimum dan maksimum yang telah ditetapkan.

Batasan saluran transmisi :

$$S_l \leq S_l^{max} \quad l = 1, 2, \dots, nbr \quad (2.10)$$

nbr adalah jumlah saluran. Besarnya aliran daya atau arus pada saluran transmisi tidak boleh melebihi batasan kapasitasnya.

### 2.3 DOPF (Dynamic Optimal Power Flow)

*Optimal power flow* (OPF) atau aliran daya optimal konvensional merupakan salah satu bagian penting dalam operasi sistem tenaga listrik. Tetapi, karena pertambahan penduduk dan permintaan akan listrik tidak menentu sehingga aliran daya optimal konvensional tidak dapat diterapkan. Hal ini dikarenakan aliran daya optimal konvensional tidak bisa mengatasi permasalahan beban non-linier atau beban dinamis. Jika dipaksakan maka akan melanggar batasan *ramprate* yang diberikan. *Dynamic optimal power flow* (DOPF) adalah pengembangan dari OPF konvensional karena memperhitungkan parameter dari *ramprate* pembangkit. DOPF digunakan untuk menentukan pembagian pembebanan pembangkit dengan beban yang dinamis[2].

Fungsi dan tujuan dari DOPF adalah untuk meminimalkan biaya generator sepanjang jangka waktu tertentu dari beberapa interval waktu dengan tetap memenuhi batasan kapasitas saluran transmisi dan *ramprate* dari masing-masing unit generator. *Ramprate* merupakan batasan yang diberikan untuk membedakan OPF konvensional dengan DOPF. *Ramprate* merupakan batasan kenaikan dan penurunan dari generator pada saat kondisi sesudah dan sebelumnya dalam interval waktu tertentu.

Fungsi biaya pembangkitan merupakan fungsi objektif yang dimodelkan dengan persamaan berikut :

$$F_i^t(P_{gi}^t) = a_i(P_{gi}^t)^2 + b_iP_{gi}^t + c_i \quad (2.11)$$

Dengan  $P_{gi}^t$  adalah daya keluaran dari generator ke-i pada saat t dan  $a_i, b_i, c_i$  merupakan koefisien biaya generator ke-i.

Fungsi obyektif pada permasalahan DOPF adalah :

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^N F_i^t (P_{gi}^t) \right) \quad (2.12)$$

Persamaan ini meminimalkan biaya pembangkitan dari semua unit pembangkit selama T interval waktu, dengan T adalah zona waktu diskrit.

Biaya diminimalkan melalui batasan :

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.13)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.14)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.15)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.16)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.17)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.18)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (2.19)$$

5. Batasan ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.20)$$

$\delta_i$  merupakan ramp rate limit dari generator ke-i. Pada penelitian ini ramp up dan ramp down diasumsikan sama dan mempunyai nilai yang konstan.

## 2.4 Dynamic Optimal Power Flow (DOPF) dengan Batas Keamanan Sistem

*Dynamic optimal power flow* (DOPF) dengan batasan *ramprate* digunakan untuk merencanakan operasi sistem tenaga listrik dengan beban yang dinamis sesuai kondisi yang sebenarnya. Sehingga dengan adanya batasan *ramprate* yang diberikan, sistem beroperasi dengan aman dan dapat menjaga umur generator dan peralatan listrik pendukungnya. Pada pengembangan DOPF, batas keamanan berupa keadaan kontingensi perlu diperhatikan pada sistem. Kontingensi yang terjadi pada generator atau saluran akan memberikan perubahan pada operasi ataupun keamanan



sistem. Untuk itu dengan menambahkan batasan keamanan pada perencanaan sistem tenaga listrik dapat memberikan pencegahan terhadap pelanggaran batasan operasi yang ada saat terjadinya gangguan. Dengan mempertimbangkan kondisi kontingensi, batasan yang ada dalam permasalahan DOPF menjadi bertambah, sehingga analisisnya menjadi lebih kompleks[2].

Batasan-batasan kondisi normal,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (2.21)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (2.22)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (2.23)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.24)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (2.25)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (2.26)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (2.27)$$

5. Batasan *ramp rate*

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (2.28)$$

Batasan – batasan saat kontingensi,

1. Batasan keseimbangan daya aktif dan reaktif pada setiap bus,

$$P_i^{kt} = P_{gi}^{kt} - P_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt} + B_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.29)$$

$$Q_i^{kt} = Q_{gi}^{kt} - Q_{di}^{kt} = \sum_{j=1}^n V_i^{kt} V_j^{kt} (G_{ij} \sin \theta_{ij}^{kt} - B_{ij} \cos \theta_{ij}^{kt}) \quad (2.30)$$

2. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^{kt} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.31)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^{kt} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.32)$$

3. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^{kt} \leq V_i^{max} \quad (2.33)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^{kt} \leq \theta_i^{max} \quad (2.34)$$

4. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^{kt} \leq S_l^{max} \quad (2.35)$$

5. Batasan ramp rate

$$\frac{-\delta_i}{5} \leq P_{gi}^{kt} - P_{gi}^t \leq \frac{\delta_i}{5} \quad (2.36)$$

6. Kopling pada keadaan normal dan kontingensi

$$|P_{Gi}^t - P_{Gi}^{kt}| \leq \Delta P_{Gimax} \quad (2.37)$$

## 2.5 Penyimpan Energi

*Energy storage* atau penyimpanan energi merupakan tempat penyimpanan energi yang digunakan untuk menyimpan energi yang dihasilkan DG (*Distributed Generator*) dan dapat digunakan dalam waktu yang dibutuhkan. Salah satu contoh tempat penyimpanan energi adalah baterai, sehingga energi yang didapatkan disimpan terlebih dahulu didalam baterai. Baterai sering digunakan dalam aplikasi sistem tenaga listrik untuk penyimpanan energi dikarenakan sifat baterai yang dapat melakukan *charging* dan *discharging*. Penggunaan penyimpanan energi dalam sistem tenaga listrik yaitu untuk memenuhi kondisi perubahan beban yang *fluktuatif*[4]. Penyimpanan energi juga dapat digunakan untuk meminimalkan biaya operasi generator pada saat terjadi kontingensi, dikarenakan letak penyimpanan energi yang dekat beban dan sifatnya yang dapat *charge* dan *discharge* secara cepat. Seperti yang dirumuskan:

$$P_{ES,CH,max} \leq P_{ES} \leq P_{ES,ds,max} \quad (2.38)$$

$$E_{ES,min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES,max} \quad (2.39)$$

Pada persamaan (4) dan (5) merupakan persamaan daya dan energi dari *energy storage* dimana daya awal yang dimiliki dari penyimpanan energi harus lebih besar dari total daya yang disimpan dan kurang dari yang dikeluarkannya. Begitu pula energinya, sehingga penyimpanan energi memiliki batas waktu atau umur dalam penggunaannya :

$$E_{ES}(t) = E_{ES0} - \sum_{t=1}^t P_{es}(t) * t \quad (2.40)$$

$t=1,2,3,\dots,T$

Biaya Penyimpanan Energi :  $CF(P_{ES})=bP$

Persamaan (6) merupakan energi total yang dapat disimpan pada penyimpanan energi. Sedangkan pada persamaan (7) merupakan daya total yang dimiliki pada penyimpanan energi pada saat  $t = 1,2,3,\dots,N$  (t dalam satuan waktu). Sehingga total Biaya operasi penyimpanan energi ( $CF \$/h$ ) pada persamaan (9) adalah koefisien yang dimiliki oleh media penyimpanan energi dikalikan dengan daya yang dikeluarkan oleh penyimpanan energinya. Pada operasinya penyimpan energi dapat

melakukan *charging* dan *discharging* setiap saat dalam memenuhi kebutuhan beban seperti pada.

## 2.6 Dynamic Line Rating dengan Heat Balance Equation

Metode *dynamic line rating* dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu : perkiraan *dynamic line rating* dari beban sistem tenaga listrik dan prediksi cuaca, estimasi *dynamic line rating* dari pengukuran tidak langsung dan evaluasi *dynamic line rating* secara *real time* dari data meteorologi terpadu. *Dynamic line rating* dapat dihubungkan pada permasalahan dari aliran daya optimal dalam skala waktu yang tertentu mulai dari perencanaan sampai dengan pengoperasian sistem tenaga secara *real time*[8].

*Dynamic line rating* digunakan untuk meningkatkan kemampuan saluran transmisi secara dinamis[9]. Penerapan *dynamic line rating* pada saluran transmisi berpotensi meningkatkan keamanan sistem dengan tingkat ekonomi yang lebih baik jika dibandingkan dengan *static line rating*. Namun karena faktor perhitungan parameter yang sulit untuk diukur secara pasti dan perhitungan secara tepat pada DLR susah untuk didapatkan, metode DLR sulit untuk diterapkan pada aplikasi nyata.

Menurut IEEE Std. 738 [3] suhu konduktor jaringan tergantung pada 1) arus yang mengalir melalui konduktor, 2) ukuran konduktor dan resistansi dan 3) kondisi cuaca sekitar (misalnya suhu, kecepatan dan arah angin, serta radiasi matahari). Berikut ini adalah persamaan *steady-state heat balance* :

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c) \quad (2.41)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.42)$$

$R(T_c)$  adalah resistansi konduktor saat temperatur  $T_c$  (temperatur maksimal konduktor).  $q_c$  adalah kehilangan panas konveksi konduktor. Nilai  $q_c$  dipengaruhi oleh kecepatan angin dan temperatur lingkungan sekitar. Persamaan untuk  $q_c$  ada tiga yaitu untuk kecepatan angin nol, angin rendah dan angin tinggi. Berikut persamaan  $q_c$  untuk kecepatan angin nol dan tinggi.

Berdasarkan rumus untuk *dynamic line rating* yang terlalu kompleks, maka perlu untuk disederhanakan sehingga bisa diaplikasikan dalam perhitungan DOPF. Terdapat dua variabel yang mempengaruhi nilai dari *dynamic line rating* yaitu suhu lingkungan ( $T_a$ ) dan kecepatan angin ( $V_w$ ). Pada sebuah konduktor tingkat kehilangan panas konveksi dipengaruhi oleh suhu lingkungan dan kecepatan angin sedangkan tingkat

kehilangan panas radiasi dipengaruhi oleh kecepatan angin saja. Pada nilai  $q_c$  (tingkat penambahan panas matahari) diasumsikan dengan nilai tetap sesuai dengan data meteorologi yang sesuai pada [3].

$$q_{cn} = 3,645 \times \rho_f^{0,5} \times D^{0,75} \times ((T_c - T_a)^{1,25} \text{ W/m} \quad (2.43)$$

$$q_c = 0.754 \left( \frac{D \times \rho_f \times V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \times k_f \times K_{angle} (T_c - T_a) \text{ W/m} \quad (2.44)$$

Keterangan:

$D$  = Diameter konduktor

$T_c$  = temperatur konduktor (100 °C)

$T_a$  = temperatur lingkungan

$\rho_f$  = kepadatan udara

$V_w$  = Kecepatan angin

$\mu_f$  = kekentalan udara

$k_f$  = konduktivitas termal udara

$K_{angle}$  = faktor arah angin

$q_r$  merupakan kehilangan panas radiasi. Nilai  $q_r$  dipengaruhi oleh temperatur lingkungan sekitar. Sedangkan  $q_s$  adalah keuntungan panas matahari. Berikut persamaan kerugian  $q_r$  dan  $q_s$  :

$$q_r = 17,8 \times D \times \varepsilon \left[ \left( \frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (2.45)$$

$$q_s = K_s \times D \times Q_s \quad (2.46)$$

Keterangan :

$\varepsilon$  = emisivity (0.23 – 0.91)

$K_{solar}$  = solar radiation heat gain coefficients

$Q_s$  = Solar radiation (MW/m<sup>2</sup>)

Penyederhanaan rumus I secara keseluruhan:

$$I_{max}(\bar{T}) = \sqrt{\frac{q_c(\bar{T}) + q_r(\bar{T}) - q_s}{R(\bar{T})}} \quad (2.47)$$

$$I = \sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.49)$$

Untuk kondisi statis,  $V_w = 0$  m/s dan  $T_a = 40^\circ\text{C}$

$$I = \sqrt{\frac{q_{cn} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.50)$$

Menentukan faktor pengali antara I dinamis dan I statis :

I statis untuk  $V_w = 0$  m/s dan  $T_a = 40^\circ\text{C}$

$$I_s = \sqrt{\frac{q_{cn} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.51)$$

Sedangkan untuk I dinamis adalah sebagai berikut,

$$I_d = \sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r \cdot [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}} \quad (2.52)$$

Sehingga didapatkan rumus untuk faktor pengali

$$F_{kalirate} = \frac{I_d}{I_s}$$

$$= \frac{\sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - 22,44}{R(T_c)}}}{\sqrt{\frac{q_{cn} + A_r [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}{R(T_c)}}} \quad (2.53)$$

$$= \sqrt{\frac{A_c (100 - T_a) \cdot V_w^{0.6} + A_r [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - 22,44}{q_{cn} + A_r [(373)^4 - (T_a + 273)^4] - q_s}} \quad (2.54)$$

## 2.7 Optimal Power Flow Mempertimbangkan Penyimpan energi dan Dynamic Line Rating

Penelitian mengenai *security constraint optimal power flow* menggunakan metode kontrol preventif dan korektif untuk pengamanan perencanaan sistem dilakukan pada tahun 2015[2]. Penelitian mengenai penyimpan energi telah banyak dilakukan salah satunya yaitu pada [4] yang menganalisis tentang pengaruh *energy storage* pada biaya operasi pembangkitan. Serta pada [5] yang menganalisis pengaruh *energy storage* pada aliran daya optimal dengan sistem DC. Penggunaan baterai dalam meningkatkan batas keamanan dan pengurangan biaya pada sistem tenaga dilakukan pada [10].

Penelitian [9] menganalisis potensi penggunaan *dynamic line rating* dalam pengaturan beban (*load shedding*) secara nyata. Penelitian mengenai analisis penggunaan *dynamic line rating* dalam permasalahan saluran transmisi yang panjang dilakukan pada [8]. Pada kedua penelitian ini dilakukan berdasarkan standart yang ada pada ieee dalam perhitungan *dynamic line rating* pada [3]. Penelitian [11] membahas tentang pengaruh yang ada pada *dynamic line rating* dalam upaya meningkatkan keamanan sistem pada aliran daya optimal.

Tugas akhir yang akan dikerjakan adalah mengenai aliran daya optimal dengan penyimpan energi mempertimbangkan batas keamanan dengan *dynamic thermal line rating*. Batasan ramprate, penambahan penyimpan energi, kapasitas saluran dan pertimbangan kontingensi akan diperhitungkan untuk memperoleh perencanaan sistem yang aman. Integrasi antara penyimpan energi dan *dynamic line rating* dalam permasalahan SCOPF akan dilakukan, sehingga akan didapatkan rating saluran yang lebih besar dan biaya pembangkitan yang lebih murah.

## BAB 3

### METODOLOGI PENELITIAN

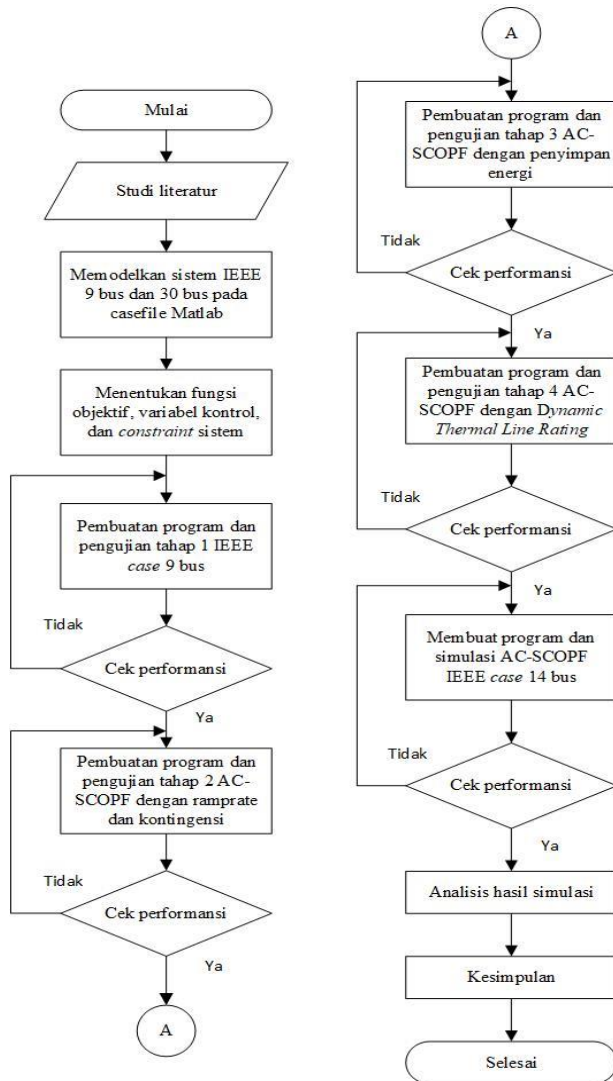
#### 3.1. Algoritma

Penelitian ini menggunakan *sequential quadratic programming* untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal dengan penyimpanan energi mempertimbangkan batas keamanan sistem dengan *dynamic thermal line rating* pada suatu sistem kelistrikan. Pengolahan data dan simulasi dilakukan menggunakan program *matpower* yang dimodifikasi pada *software* matlab. Dengan alur penyelesaian penelitian sesuai dengan gambar 3.1.

Pengerjaan tugas akhir dimulai dengan studi literatur mengenai sistem kelistrikan, aliran daya optimal, keamanan sistem, dan optimasi menggunakan *sequential quadratic programming* untuk permasalahan ACOPF. Pemodelan menggunakan case *M-file* IEEE 9 bus dan 14 bus yang dimodifikasi. Setelah itu menentukan fungsi objektif, *constraint* yang meliputi *equality constraint* dan *inequality constraint* serta variabel kontrol dari permasalahan SCOPF. Pembuatan program AC-SCOPF dengan rating saluran dinamis dilakukan dengan empat tahap pengujian.

Tahap pertama yaitu tahap pengujian *sequential quadratic programming* AC-SCOPF dengan ACOPF secara individual. Pengujian menggunakan dua profil beban dan dilakukan dengan mengecek variabel kontrol sistem yang meliputi magnitudo dan sudut tegangan tegangan serta daya pembangkitan tanpa adanya batasan *ramprate*. Program valid jika nilai variabel kontrol antara AC-SCOPF dengan ACOPF telah sama.

Tahap kedua yaitu pengujian AC-SCOPF dengan batasan *ramprate*, serta kondisi kontingensi. Pengujian dilakukan dengan mengecek kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan masing-masing generator setiap satu jam. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi antara AC-SCOPF tanpa *ramprate* dengan AC-SCOPF dengan batasan *ramprate* pada kondisi normal dan pada saat terjadi kontingensi serta aliran daya pada saluran sesuai dengan kapasitasnya.



**Gambar 3.1** Flowchart alur sistem



Tahap ketiga yaitu AC-SCOPF dengan penyimpanan energi. Pengujian dilakukan melihat pengaruh yang dihasilkan oleh penyimpanan energi tentang kenaikan maupun penurunan daya pembangkitan antara kondisi normal dengan kondisi kontingensi serta biaya pembangkitannya.

Tahap keempat yaitu AC-SCOPF dengan penyimpanan energi dan rating saluran yang dinamis. Pengujian dilakukan dengan membandingkan biaya keseluruhan sistem antara AC-SCOPF biasa dengan AC-SCOPF menggunakan rating saluran yang dinamis. Setelah semua tahapan pengujian dengan sistem IEEE 9 bus dilakukan, maka terakhir dilanjutkan dengan pengujian IEEE 14 bus. Hasil keluaran program pada sistem 14 bus kemudian dianalisa. Setelah dilakukan analisa kemudian didapatkan kesimpulan dari tugas akhir ini.

### **3.2. Penerapan Sequential Quadratic Programming pada Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem [12]**

*Sequential quadratic programming* merupakan salah satu metode yang digunakan pada optimasi kondisi *non-linear*. Metode SQP dianggap sebagai metode pemrograman *non-linear* terbaik untuk permasalahan optimasi. SQP lebih unggul dengan metode optimasi *non-linear* lainnya dalam hal efisiensi, akurasi dan presentase solusi sukses selama sejumlah test permasalahan.

Pada matlab terdapat fungsi *fmincon* yang dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi *non-linear* dengan metode *sequential quadratic programming*. Matpower adalah salah satu *M-files* yang telah dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan OPF. Pada matpower terdapat fungsi *fmincon* yang dapat digunakan untuk perhitungan ACOPF.

Berikut adalah argumen input dari *fmincon* :

- A. Fun : fungsi yang diminimalkan dan merupakan fungsi yang menampung vektor  $x$  dan mengembalikan skalar  $f$ , fungsi tujuan dievaluasi pada vektor  $x$ . Fun adalah fungsi handle dari sebuah file.
- B.  $x_0$  : Vektor yang menyatakan initial point dari vektor  $x$ .
- C. Aeq : Matriks yang menyatakan koefisien linier dari *equality constraint*.
- D. beq : Vektor yang menyatakan vektor konstan dari *equality constraint* dimana  $Aeq \cdot x = beq$ .
- E. Aineq : Matriks yang menyatakan koefisien non linear dari *inequality constraint*.

- F. `bineq` : Vektor yang menyatakan vektor konstan dari *inequality constraint*, dimana  $A_{ineq} * x \leq bineq$ .
- G. `Lb` : vektor yang menyatakan batas nilai bawah dari persamaan  $lb \leq x \leq ub$ .
- H. `Ub` : vektor yang menyatakan batas nilai atas dari persamaan  $lb \leq x \leq ub$ .

Perintah yang dapat digunakan untuk melakukan pemanggilan program dengan argumen input dalam *fmincon\_matpower* adalah sebagai berikut :

1. `x = fmincon (fun,x0,A,b)`  
Meminimalkan fungsi `x` dimulai dengan nilai awal `x0` yang diuraikan dalam fungsi `fun` sesuai dengan *inequality constraint* linear  $A * x \leq b$ , dengan `x0` bisa berupa skalar, vector atau matrix.
2. `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq)`  
Meminimalkan subjek `fun` sesuai dengan persamaan linear  $Aeq * x = beq$  dan  $A * x \leq b$ . Jika tidak ada *inequality constraint*, maka `A = []` dan `B = []`.
3. `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub)`  
Medefinisikan batas bawah dan batas atas dalam menentukan variabel `x`, sehingga solusinya akan selalu dalam batasan  $lb \leq x \leq ub$ . Jika tidak ada *equality constraint*, maka `Aeq = []` dan `beq = []`, dan jika batas bawah `x` tidak ada maka `lb = -inf` dan jika batas atas `x` tidak ada maka `ub = inf`.
4. `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon)`  
Meminimalkan subjek sesuai *inequality constraint non-linear* `c(x)` atau *equality constraint* `CEQ (x)` yang didefinisikan dalam *nonlcon*. `fmincon` mengoptimalkan subjek dengan memenuhi  $c(x) \leq 0$  dan  $CEQ(x) = 0$ . Jika tidak ada batas nilai untuk `x` maka `lb=[]` dan `ub=[]`.
5. `x = fmincon (fun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,nonlcon,options)`  
Meminimalkan subjek dengan pilihan optimasi yang ditentukan dalam `options`. Jika tidak ada *equality dan inequality constraint non-linear* maka `nonlcon = []`.
6. `x = fmincon (problem)`  
Untuk menemukan nilai minimum dari `problem`, dimana `problem` adalah struktur yang dijelaskan dalam input argument.
7. `[x,fval] = fmincon (...)`  
Mengembalikan nilai fungsi obyektif `fun` pada solusi `x`.

8. [x,fval,exitflag] = fmincon (...)  
Mengembalikan nilai *exitflag* yang mendeskripsikan kondisi keluaran fmincon.
9. [x,fval,exitflag,output] = fmincon (...)  
Mengembalikan struktur keluaran dengan informasi tentang optimasi.
10. [x,fval,exitflag,output,lambda] = fmincon (...)  
Mengembalikan struktur lambda dengan pengali Lagrange yang berisi solusi x.
11. [x,fval,exitflag,output,lambda,grad] = fmincon (...)  
Mengembalikan nilai *gradient* fungsi fun sebagai solusi x.
12. [x,fval,exitflag,output,lambda,grad,hessian] = fmincon (...)  
Mengembalikan nilai hessian sebagai solusi x.

### 3.2.1 Inisialisasi Permasalahan DOPF (Dynamic Optimal Power Flow)

Fungsi objektif :

$$\text{minimize } \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^{ng} F_i^t(P_{gi}^t) \right) \quad (3.1)$$

$$F_i(P_i) = a_i P_{gi}^2 + b_i P_{gi} + c_i \quad (3.2)$$

Keterangan:

$F_i^t(P_{gi}^t)$  = Besar biaya pembangkitan pada pembangkit ke-i pada waktu ke-t

$P_{gi}^t$  = Daya output dari pembangkit ke-i pada waktu ke-t

T = jumlah rentang waktu beban

ng = jumlah generator

$a_i, b_i, c_i$  = koefisien biaya pembangkitan ke-i

Equality constraint

Active Power Balance

$$P_i^t = P_{gi}^t - P_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \cos \theta_{ij}^t + B_{ij} \sin \theta_{ij}^t) \quad (3.3)$$

$$Q_i^t = Q_{gi}^t - Q_{di}^t = \sum_{j=1}^n V_i^t V_j^t (G_{ij} \sin \theta_{ij}^t - B_{ij} \cos \theta_{ij}^t) \quad (3.4)$$

saat  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  dan menyatakan jumlah bus.  $P_i^t$  dan  $Q_i^t$  menyatakan injeksi daya aktif dan reaktif di bus i pada waktu ke-t.  $P_{di}^t$  dan  $Q_{di}^t$  menyatakan daya aktif dan reaktif beban di bus i pada waktu ke-t.

Inequality constraint :

a. Batasan pembangkitan daya untuk generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi}^t \leq P_{gi}^{max} \quad (3.5)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi}^t \leq Q_{gi}^{max} \quad (3.6)$$

b. Batasan tegangan

$$V_i^{min} \leq V_i^t \leq V_i^{max} \quad (3.7)$$

$$\theta_i^{min} \leq \theta_i^t \leq \theta_i^{max} \quad (3.8)$$

c. Batasan aliran daya saluran

$$S_l^t \leq S_l^{max} \quad (3.9)$$

d. Batasan ramp rate

$$-\delta_i \leq P_{gi}^{t+1} - P_{gi}^t \leq \delta_i \quad (3.10)$$

Variabel yang akan dioptimasi disebut dengan variabel kontrol. Pada permasalahan ACOPF, variabel kontrol berupa magnitude dan sudut tegangan serta daya aktif dan reaktif pembangkitan generator. Jika nb menyatakan jumlah bus, ng menyatakan jumlah generator, maka jumlah variabel adalah n, dimana nilai  $n = 2 \cdot (nb + ng)$ . Contoh jika  $nb = 3$ ,  $ng = 2$ , maka ukuran matriks variabel kontrol atau x adalah sebesar [10,1]. Sehingga dapat dituliskan sebagai berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

### 3.2.2 AC-DOPF Pada Sequential Quadratic Programming

#### 3.2.2.1 Inisialisasi $x_0$ sebagai nilai awal

Pada fungsi *fmincon* membutuhkan input argumen  $x_0$  sebagai nilai awal, dimana ukuran  $x_0$  sama dengan ukuran matriks  $x$ . Untuk level beban =  $t$  maka ukuran matriks  $x_0$  adalah  $[2*(nb+ng)*t, 1]$ . Misal untuk sistem dengan  $nb = 3$ ,  $ng = 2$  dan level beban =  $t$ , maka matriks  $x_0$  adalah sebagai berikut :

$$x = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ P_{g1} \\ P_{g2} \\ Q_{g1} \\ Q_{g2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dimana pada saat kondisi sebarang  $t$ , maka besar matriks  $x_0$  bernilai  $t$  kali  $x_0$ .

#### 3.2.2.2 Pembentukan $f$ dan $df$ yang merupakan fungsi objektif

Pada pembentukan  $f$  dan  $df$ ,  $f$  dinyatakan sebagai nilai total biaya pembangkitan sedangkan  $df$  adalah turunan dari fungsi  $f$ . Nilai  $f$  dijumlahkan untuk setiap level beban, dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$f = \sum_{i=1}^{jam} f_i \quad (3.13)$$

Untuk sistem dengan 3 bus ( $nb=3$ ) dan 2 generator ( $ng=2$ ) maka ukuran matriks  $df$  sama dengan matriks  $x$ . Matriks  $df$  dapat dituliskan sebagai berikut :

$$df = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{df}{P_{g1}} \\ \frac{df}{P_{g2}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Sedangkan dengan level beban = t, maka ukuran matriks df adalah  $[(2nb+2ng)*t, 1]$  atau nilainya sebesar t kalinya.

### 3.2.2.3 Pembentukan Equality Constraint berupa Matrik geq dan dgeq

Dalam permasalahan ACOPF *equality constraint* berupa matriks *geq* dan *dgeq*. Dua matriks tersebut merupakan *power balance* dari sistem. Untuk sistem dengan 3 bus ( $nb=3$ ), 2 generator ( $ng=2$ ) dan 2 beban yang terletak di bus 1 dan 3, maka matriks awal dari *geq* adalah sebagai berikut:

$$geq = \begin{bmatrix} P_{d1} \\ 0 \\ P_{d2} \\ Q_{d1} \\ 0 \\ Q_{d2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Untuk level beban = t, ukuran matriks *geq* menjadi  $[2*ng*t, 1]$ .

Sedangkan *dgeq* merupakan turunan dari matriks *geq*, ukuran matriks *dgeq* adalah  $[2*(nb+ng)*t, 2*nb*t]$ . Pada matriks *dgeq* setiap bagian diturunkan terhadap bagian tersebut, sehingga bagian yang lain menjadi nol. Misal dengan b = jumlah bus dan m = jumlah generator, maka matriks *dgeq* dapat dituliskan sebagai berikut :

Aktif power balance reaktif power balance

$$d_{geq} = \begin{bmatrix} \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} & \frac{geq}{d\theta_{11}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} & \frac{geq}{d\theta_{b1}} & \dots & \frac{geq}{d\theta_{bb}} \\ \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} & \frac{geq}{dv_{11}} & \dots & \frac{geq}{dv_{1b}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} & \frac{geq}{dv_{b1}} & \dots & \frac{geq}{dv_{bb}} \\ \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} & \frac{geq}{dP_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dP_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} & \frac{geq}{dP_{gm}} & \dots & \frac{geq}{dP_{gm}} \\ \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \frac{geq}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{geq}{dQ_{g1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} & \frac{geq}{dQ_m} & \dots & \frac{geq}{dQ_m} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Pada level beban = t maka matriks  $d_{geq}$  disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks  $d_{geq}$  menjadi  $[2*(nb+ng)*t : 2*nb*t]$ , berikut merupakan matriks  $d_{geq}$  dengan periode lebih dari satu jam :

$$d_{geq} = \begin{bmatrix} d_{geq_1} & zeros & zeros & zeros \\ zeros & d_{geq_2} & zeros & zeros \\ zeros & zeros & \ddots & zeros \\ zeros & zeros & zeros & d_{geq_t} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

#### 3.2.2.4 Pembentukan Inequality Constraint berupa matriks g, dg dan Af

Pada permasalahan ACOPF *inequality constraint* berupa matriks  $g$  dan  $dg$ . Dua matriks tersebut merupakan batasan aliran daya dengan *from bus* dan *to bus limit*. Misal untuk sistem yang mempunyai 3 bus, 2 generator dan 3 saluran ( $nbr=3$ ), maka ukuran awal dari matriks  $g$  adalah :

$$g = \begin{bmatrix} Sf_1 \\ Sf_2 \\ Sf_3 \\ St_1 \\ St_2 \\ St_3 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Sf merupakan aliran daya *from bus* dan St merupakan aliran daya *to bus*. Untuk level beban = t, maka matriks g menjadi t kali matriks g awal.

Sedangkan matriks dg adalah turunan dari g, misal dengan b = jumlah bus, m = jumlah generator dan br = jumlah saluran maka matriks dg sebagai berikut :

$$dg = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{from bus flow} & & \text{to bus flow} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{g}{d\theta_{11}} \\ \vdots \\ \frac{g}{d\theta_{b1}} \\ \frac{g}{dv_{11}} \\ \vdots \\ \frac{g}{dv_{b1}} \\ \frac{g}{dP_{g1}} \\ \vdots \\ \frac{g}{dP_{gm}} \\ \frac{g}{dQ_{g1}} \\ \vdots \\ \frac{g}{dQ_m} \end{matrix} & \begin{matrix} \dots & \frac{g}{d\theta_{1br}} & \dots & \frac{g}{d\theta_{bbr}} & \dots & \frac{g}{dv_{1br}} & \dots & \frac{g}{dv_{bbr}} & \dots & \frac{g}{dP_{g1}} & \dots & \frac{g}{dP_{gm}} & \dots & \frac{g}{dQ_{g1}} & \dots & \frac{g}{dQ_m} \end{matrix} \end{matrix} \quad (3.19)$$

Pada saat level beban = t, maka matriks dg disusun dibawah secara diagonal. Sehingga ukuran matriks dg menjadi  $[2*(nb+ng)*t, 2*nbr*t]$ , berikut merupakan matriks dg dengan periode lebih dari satu jam :

$$dg = \begin{bmatrix} dg_1 & \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & dg_2 & \text{zeros} & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \ddots & \text{zeros} \\ \text{zeros} & \text{zeros} & \text{zeros} & dg_t \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Pada pembentukan matriks *ramprate*, dimana pada AC-SCOPF ini membuat matriks baru A untuk dimasukkan pada matriks Af dan matriks b untuk memberikan batasan pada nilai bf. Pembentukan matriks yang menyatakan *ramprate* masuk dalam matrik Af dan bf dimana nilai  $Af^*x \leq bf$ . Misal untuk sistem dengan jumlah bus =3, generator = 2 dan level beban = 2, maka matriks untuk kondisi normal ke kondisi normal selanjutnya sebagai berikut :



$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$bf = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Pemberian angka 1 dan -1 pada daerah matriks generator diatas dikarenakan cara kerja *ramprate*

$$P_1^{t=1} - P_1^{t=2} \leq \delta_1 \quad (3.23)$$

atau

$$-P_1^{t=1} + P_1^{t=2} \leq \delta_1 \quad (3.24)$$

Pada persamaan 3.26 merupakan persamaan batas atas *ramprate* dan persamaan 3.27 merupakan persamaan batas bawah *ramprate* pada AC-SCOPF. Sedangkan pada saat kontingensi, dibutuhkan *dispatch* generator yang relatif cepat. Sehingga, *ramprate* kontingensi dibuat 0,2 dari *ramp rate* generator pada umumnya. Agar pada saat kontingensi dapat bekerja cepat selama 12 menit atau 0,2 jam. Matriks untuk kondisi normal ke kondisi kontingensi adalah sebagai berikut :

$$Af = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Batasan *ramp rate* digunakan untuk kopling pembangkitan antara kondisi normal dan juga kondisi kontingensi, selain itu *ramp rate* juga merupakan kopling antara kondisi normal pada waktu t dengan kondisi normal pada waktu t+1.

Pembentukan matriks *energy storage* dapat dirumuskan :

$$A_f = \begin{bmatrix} 0000000 & 1 & 0 & 0 & 000000 & -1 & 0 & 0 \\ 0000000 & 0 & 1 & 0 & 000000 & 0 & -1 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & -1 & 000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0000000 & -1 & 0 & 0 & 000000 & 1 & 0 & 0 \\ 0000000 & 0 & -1 & 0 & 000000 & 0 & 1 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & 1 & 000000 & 0 & 0 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & 0 & 000000 & 1 & 0 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & 0 & 000000 & 0 & 1 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & -1 & 000000 & 0 & 0 & -1 \\ 0000000 & 0 & 0 & 0 & 000000 & -1 & 0 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & 0 & 000000 & 0 & -1 & 0 \\ 0000000 & 0 & 0 & 1 & 000000 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$bf = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ SOC_{max} \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ SOC_{min} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Berdasarkan pada matriks diatas dimana peletakan persamaan baterai diletakkan setelah peletakan *ramprate*. Pemberian angka -1 menandakan bahwa sistem baterai itu menyatakan *discharging* dan angka 1 menandakan baterai melakukan *charging*, dengan *bf* merupakan batasan *charging* dan *discharging* baterai sebagai *energy storage* agar tidak melebihi  $SOC_{max}$  atau tidak kurang dari  $SOC_{min}$  yang telah ditentukan.

### 3.2.2.5 Pembentukan vektor lb dan ub

Vektor lb dan ub merupakan batas atas dan bawah dari variabel kontrol (x). Pada DOPF variabel kontrol yang dioptimasi terdiri dari sudut tegangan, magnitude tegangan, daya aktif dan daya reaktif. Sehingga

vektor lb dan ub berisi batas atas dan bawah dari variabel tersebut.

$$\begin{bmatrix} \theta_{1min}^t \\ \theta_{2min}^t \\ \theta_{3min}^t \\ v_{1min}^t \\ v_{2min}^t \\ v_{3min}^t \\ P_{g1min}^t \\ P_{g2min}^t \\ SOC_{min} \\ Q_{g1min}^t \\ Q_{g2min}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_1^t \\ \theta_2^t \\ \theta_3^t \\ v_1^t \\ v_2^t \\ v_3^t \\ P_{g1}^t \\ P_{g2}^t \\ E(t) \\ Q_{g1}^t \\ Q_{g2}^t \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \theta_{1max}^t \\ \theta_{2max}^t \\ \theta_{3max}^t \\ v_{1max}^t \\ v_{2max}^t \\ v_{3max}^t \\ P_{g1max}^t \\ P_{g2max}^t \\ SOC_{max} \\ Q_{g1max}^t \\ Q_{g2max}^t \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Untuk level beban = t, maka matriks lb dan ub menjadi selebar t kali matriks semula.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 4

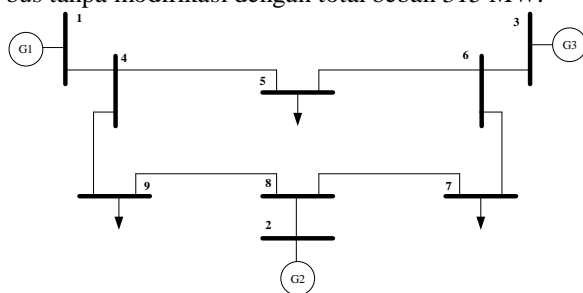
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Analisis Kontingensi

Pada operasi sistem tenaga listrik. Analisis terhadap kondisi kontingensi merupakan salah satu komponen penting dalam permasalahan aliran daya optimal dengan batas keamanan sistem. Analisis kontingensi dilakukan pada setiap saluran sistem. Analisis kontingensi dilakukan dengan melihat total biaya pembangkitan pada sistem. Dengan biaya pembangkitan yang besar dapat diketahui saluran memberikan dampak yang besar terhadap sistem. Sehingga, dengan adanya analisis kontingensi ini dapat mengetahui dimana letak saluran yang memberikan biaya paling mahal dalam sistem.

##### 4.1.1 Analisis Kontingensi IEEE Sistem 9 Bus

Pada IEEE Sistem 9 bus ini mempunyai 3 pembangkit, 3 beban dan 9 saluran. Analisis kontingensi pada sistem 9 bus ini menghasilkan daftar urutan dari saluran yang memiliki dampak terbesar hingga yang terkecil ketika saluran tersebut mengalami kontingensi. *Single line diagram* sistem 9 bus IEEE dapat dilihat pada gambar 4.1. Daftar urutan hasil analisis kontingensi sistem 9 bus IEEE ditunjukkan oleh tabel 4.1. Berdasarkan tabel 4.1 terlihat bahwa saluran no.7 yaitu saluran dari bus 8 ke bus 2 adalah saluran yang menghasilkan total biaya terbesar dengan \$5309.8. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pada saluran dari bus 8 ke bus 2 memiliki dampak terbesar jika mengalami kontingensi. Hasil biaya pembangkitan dalam tabel merupakan hasil running program sesuai IEEE case 9 bus tanpa modifikasi dengan total beban 315 MW.



**Gambar 4.1** Sistem IEEE 9 bus

**Tabel 4.1** Pengaruh kontingensi pada sistem IEEE 9 Bus

Urutan	No	From Bus	To Bus	Biaya (\$)
1	7	8	2	5309.8
2	1	1	4	5296.7
3	2	4	5	5296.7
4	3	5	6	5296.7
5	4	3	6	5296.7
6	5	6	7	5296.7
7	6	7	8	5296.7
8	8	8	9	5296.7
9	9	9	4	5296.7

#### 4.1.2 Analisis Kontingensi IEEE Sistem 14 Bus

Pada IEEE sistem 14 bus memiliki 5 generator dan 20 saluran. Karena pada sistem ini memiliki terlalu banyak saluran, maka akan ditampilkan 10 saluran saja yang telah diurutkan berdasarkan biaya yang paling besar. Seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.2

**Tabel 4.2** Pengaruh kontingensi pada IEEE sistem 14 bus

Urutan	No	From Bus	To Bus	Biaya (\$)
1	1	1	2	8086.6
2	2	1	5	8084.6
3	3	2	3	8084.6
4	4	2	4	8084.6
5	5	2	5	8084.6
6	6	3	4	8084.6
7	7	4	5	8084.6
8	8	4	7	8084.6
9	9	4	9	8084.6
10	10	5	6	8084.6

Pada tabel 4.2 dapat dilihat bahwa pada saluran no. 10 yaitu dari bus 1 ke bus 2 memiliki pengaruh kontingensi yang besar Sehingga untuk analisis kontingensi selanjutnya yaitu dengan menggunakan saluran nomer satu dikarenakan sistem masih konvergen.

## 4.2 Simulasi IEEE Sistem 9 Bus

Pengujian dilakukan dengan menggunakan program aliran daya optimal dinamis mempertimbangkan batas keamanan sistem yang selanjutnya disebut dengan AC-SCOPF, sistem 9 bus IEEE diuji terlebih dahulu dengan software yang sudah ada di matpower yang selanjutnya disebut ACOF Matpower. Pengujian ini dilakukan dengan empat tahapan, yaitu :

1. Pengujian tanpa batasan
2. Pengujian batasan *ramprate* dan kontingensi.
3. Pengujian dengan penyimpan energi
4. Pengujian dengan penyimpan energi dan rating saluran dinamis

Pengujian dilakukan dengan sistem modifikasi IEEE 9 bus dengan data yang sesuai tabel 4.3, tabel 4.4 dan tabel 4.5 yang merupakan data pembangkit, saluran dan beban. Modifikasi dilakukan dengan menaikkan sedikit nilai beban dari IEEE sistem 9 bus tanpa modifikasi.

**Tabel 4.3** Data pembangkit modifikasi IEEE sistem 9 bus

No.	Cost Function	Pmax	Pmin	Ramprate
1	$0.11P_1^2 + 5P_1 + 150$	250	10	30
2	$0.085P_2^2 + 1.2P_2 + 600$	300	10	40
3		270	10	35

**Tabel 4.4** Data saluran modifikasi IEEE sistem 9 bus

No	From Bus	To Bus	r	X	b	Kapasitas (MW)
1	1	4	0	0.0576	0	250
2	4	5	0.017	0.092	0.158	250
3	5	6	0.039	0.17	0.358	150
4	3	6	0	0.0586	0	300
5	6	7	0.0119	0.1008	0.209	150
6	7	8	0.0085	0.072	0.149	250
7	8	2	0	0.0625	0	250
8	8	9	0.032	0.161	0.306	100
9	9	4	0.01	0.085	0.176	250

**Tabel 4.5** Data beban modifikasi IEEE sistem 9 bus

Bus	Beban (MW)
1	0
2	0
3	0
4	0
5	110
6	0
7	125
8	0
9	150

#### 4.2.1 Pengujian Tahap 1

Pada pengujian tahap pertama ini dilakukan untuk validasi antara hasil AC-OPF secara individual sama dengan *sequential quadratic programming* AC-SCOPF matpower . Pengujian akan dilakukan pada kondisi 2 level beban yang sesuai pada tabel 4.6 dan hasil simulasi akan ditampilkan pada tabel 4.7 dan 4.8.



**Tabel 4.6** Kondisi dua level beban pada jam pertama dan kedua

No.	Beban (MW)			Total Beban (MW)
	Bus 5	Bus 7	Bus 9	
1	110	125	150	385
2	121	137.5	165	423.5

**Tabel 4.7** Hasil sudut dan tegangan bus, daya aktif dan reaktif generator serta biaya total pembangkitan pada pengujian tahap 1.

Variabel	AC-OPF		AC-SCOPF	
	JAM 1	JAM 2	JAM 1	JAM 2
Θ1	0	0	0	0
Θ2	0.0966	0.1039	0.0966	0.1039
Θ3	0.0616	0.0644	0.0616	0.0644
Θ4	-0.0542	-0.0607	-0.0542	-0.0607
Θ5	-0.0888	-0.0995	-0.0888	-0.0995
Θ6	0.0058	0.0035	0.0058	0.0035
Θ7	-0.0336	-0.0397	-0.0336	-0.0397
Θ8	0.0125	0.0114	0.0125	0.0114
Θ9	-0.1014	-0.1137	-0.1014	-0.1137
V1	1.0999	1.1	1.0999	1.1
V2	1.1	1.1	1.1	1.1
V3	1.0886	1.0928	1.0886	1.0928
V4	1.0918	1.0876	1.0918	1.0876
V5	1.0797	1.0733	1.0797	1.0733
V6	1.1	1.1	1.1	1.1
V7	1.0877	1.0836	1.0877	1.0836
V8	1.0997	1.0965	1.0997	1.0965
V9	1.0668	1.0579	1.0668	1.0579
P1	113.05	126.03	113.05	126.03
P2	162.71	178.33	162.71	178.33
P3	113.99	124.92	113.99	124.92
Q1	18.7	27.55	18.7	27.55
Q2	<b>7.35</b>	<b>14.36</b>	<b>7.35</b>	<b>14.36</b>

**Tabel 4.8** Hasil sudut dan tegangan bus, daya aktif dan reaktif generator serta biaya total pembangkitan pada pengujian tahap 1 (lanjutan)

Variabel	AC-OPF		AC-SCOPF	
	JAM 1	JAM 2	JAM 1	JAM 2
Q3	-18.04	-9.54	-18.04	-9.54
Total Daya (MW)	385	423.5	385	423.5
Biaya (\$)	7207.4	8416	7207.4	8416

#### 4.2.1.1 Analisis Pengujian Tahap 1

Pada Tabel 4.7 dan 4.8 dapat dilihat hasil simulasi AC-OPF dengan SCOPF yang memiliki nilai yang sama. Pada total daya pembangkitan melebihi daya dari beban yang di *suplay*, hal ini dikarenakan terdapat losses saluran. Sehingga dapat disimpulkan bahwa analisa menggunakan program *sequential quadratic* programming pada AC-SCOPF matpower dapat digunakan untuk menganalisa aliran daya optimal pada tahap selanjutnya.

#### 4.2.2 Pengujian Tahap 2

Pada pengujian tahap kedua ini akan dibedakan menjadi dua kondisi yaitu kondisi normal dan kondisi kontingensi. Pada kondisi normal ini akan diuji pengaruh *ramprate* pada generator. *Ramprate* merupakan batas suatu generator dalam menaik serta menurunkan pembangkitan dalam waktu 1 jam.

##### 4.2.2.1 Pengujian Kondisi Normal

Pengujian ini akan dilakukan dengan menggunakan empat kondisi beban, dimana dengan penggunaan empat kondisi beban ini dapat memperlihatkan pengaruh adanya *ramprate* pada generator. Pada tabel 4.9 merupakan empat kondisi beban yang akan diuji. Sedangkan pada tabel 4.10 dan 4.12 merupakan daya pembangkitan generator pada empat kondisi beban tanpa menggunakan *ramprate* dan dengan menggunakan *ramprate*. Sedangkan pada tabel 4.11 dan 4.13 akan ditampilkan selisih output generator pada kondisi sesudahnya dengan sebelumnya tanpa dan dengan menggunakan *ramprate*.

**Tabel 4.9** Kondisi beban

Kondisi	Total Beban (MW)
1	385
2	462
3	519.75
4	577.5

**Tabel 4.10** Kondisi normal tanpa *ramprate*

Kondisi	Daya Pembangkit (MW)			Biaya (\$)
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	
1	113.05	162.71	113.99	7207
2	139.64	193.45	135.53	9737
3	177.68	199.1	151.13	12004
4	215.57	205.15	166.77	14672

**Tabel 4.11** Selisih daya output generator setiap jam pada kondisi tanpa *ramprate*

Jam Ke-	1-2	2-3	3-4
P1 (MW)	26.59	38.04	37.89
P2 (MW)	30.74	5.65	6.05
P3 (MW)	21.54	15.6	15.64

**Tabel 4.12** Kondisi normal dengan *ramprate*

Kondisi	Daya Pembangkit (MW)			Biaya (\$)
	Unit 1	Unit 2	Unit 3	
1	120.21	158.36	110.96	7216
2	150.21	187.17	131.13	9758
3	180.21	202.69	144.93	12011
4	210.21	197.25	179.93	14704

**Tabel 4.13** Selisih daya output generator setiap jam pada kondisi normal dengan ramprate

Jam Ke-	1-2	2-3	3-4
P1	30	30	30
P2	28.81	15.52	-5.44
P3	20.17	13.8	35

#### 4.2.2.2 Analisis Kondisi Normal

Pada tabel 4.10 dapat dilihat bahwa pada generator unit satu di kondisi 3 ke kondisi 4 melebihi batas keamanan (*constraint*) yaitu >30 MW dalam 1 jam dan dapat memperpendek umur generator. Sehingga dengan adanya *ramprate* yang diberikan maka tidak ada satupun unit dari generator yang melanggar batas keamanan. Walaupun dengan adanya *ramprate* biaya operasi menjadi lebih mahal, tetapi dengan adanya *ramprate* dapat menambah masa umur dari unit pembangkit.

#### 4.2.2.3 Pengujian Kondisi Kontingensi

Pada tahap ini akan dilakukan pengujian AC-OPF pada saat terjadi kontingensi. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah pada saat terdapat kontingensi menghasilkan perhitungan daya keluaran masing-masing pembangkit yang tidak melebihi batasan *ramprate* dan batas saluran. Pengujian ini dilakukan dengan enam kondisi seperti yang terdapat pada tabel 4.14 , daya yang dikeluarkan pembangkit pada tabel 4.15 , 4.16 selisih daya output generator pada saat kondisi normal dan kontingensi pada tabel 4.17, serta salah satu aliran daya pada kondisi normal dan kontingensi akan ditampilkan pada tabel 4.18 serta 4.19 dan total biaya operasi akan ditampilkan pada gambar 2.

**Tabel 4.14** Pengujian selama 6 jam

Jam Ke-	Total Beban (MW)
1	385
2	404.25
3	423.5
4	435.05
5	446.6
6	438.9

**Tabel 4.15** Kondisi Normal

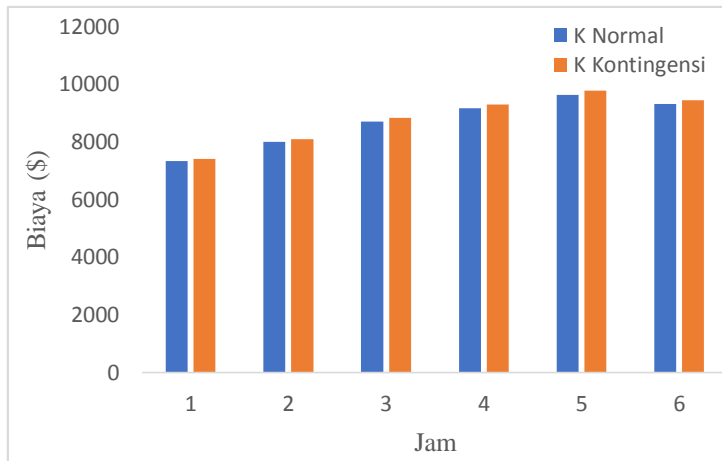
Kondisi	Daya Pembangkit (MW)		
	Unit 1	Unit 2	Unit 3
1	128.51	132.93	127.85
2	139.04	132.93	136.96
3	149.59	132.93	146.08
4	155.93	132.93	151.55
5	162.28	132.93	157.03
6	158.04	132.93	153.38

**Tabel 4.16** Kondisi Kontingensi

Kondisi	Daya Pembangkit (MW)		
	Unit 1	Unit 2	Unit 3
1	133.04	124.93	131.23
2	144.61	124.93	139.29
3	155.39	124.93	148.18
4	151.72	124.93	153.68
5	168.04	124.93	159.21
6	163.81	124.93	155.54

**Tabel 4.17** Selisih kondisi kontingensi dan normal pada setiap jam

Generator Data	Ramprate	Perubahan Daya Kondisi Normal dan Kontingensi					
		1	2	3	4	5	6
Unit 1	6	4.53	5.57	5.8	-4.21	5.76	5.77
Unit 2	8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
Unit 3	7	3.38	2.33	2.1	2.13	2.18	2.16



**Gambar 4.2** Harga pada saat normal dan kontingensi

**Tabel 4.18** Kondisi normal pada jam ke-6

From	To	Kapasitas (MVA)	From Bus Injection	
			P (MW)	Q (MVAR)
1	4	250	158.04	31.17
4	5	250	56.78	-0.71
5	6	150	-69.09	-19.08
3	6	300	153.38	-4.71
6	7	150	82.67	-0.16
7	8	250	-60.52	-21
8	2	250	-132.93	-2.78
8	9	250	72.13	-2.9
9	4	250	-100.32	-31.73

**Tabel 4.19** Kondisi kontingensi pada jam ke-6

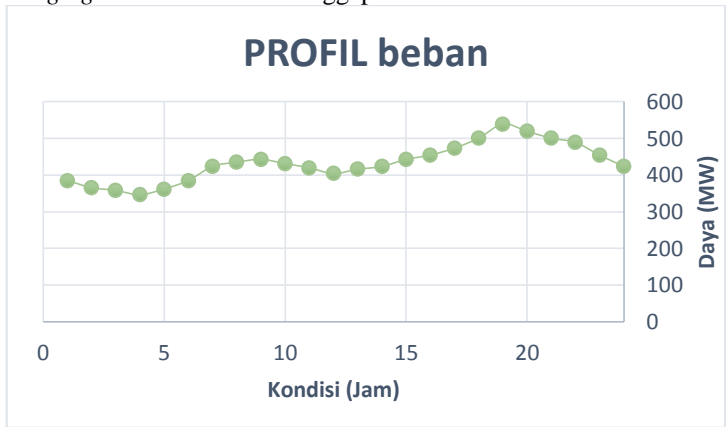
From	To	Kapasitas (MVA)	From Bus Injection	
			P(MW)	Q(MVAR)
1	4	250	158.04	31.17
4	5	250	56.78	-0.71
5	6	150	-69.09	-19.08
3	6	300	153.38	-4.71
6	7	150	82.67	-0.16
7	8	250	-60.52	-21
8	2	250	-132.93	-2.78
8	9	250	72.13	-2.9
9	4	250	-100.32	-31.73

#### 4.2.2.4 Analisis Kondisi Kontingensi

Hasil simulasi pada gambar 4.2 menunjukkan total biaya pembangkitan kondisi kontingensi lebih mahal jika dibandingkan pada saat kondisi normal. Hal itu dikarenakan pada saat terjadi kontingensi aspek ekonomi diabaikan, prioritas utama pada saat terjadi kontingensi adalah keamanan sistem. Pada gambar 4.2 dan tabel 4.15 serta 4.16 terlihat bahwa biaya sistem dengan mempertimbangkan kontingensi mempunyai nilai yang lebih besar, dikarenakan penyesuaian pembangkitan untuk memastikan *re-dispatch* agar tidak melanggar batasan *ramprate* antara kondisi normal dengan kontingensi dan batasan kapasitas saluran. Berdasarkan tabel 4.17, dapat dilihat bahwa perubahan daya pembangkitan antara kondisi normal dan kondisi kontingensi tidak melewati batasan *ramprate* dari pembangkit. Pada tabel 4.18serta 4.19 terlihat bahwa pada saat kondisi normal maupun kontingensi sistem dalam keadaan aman karena tidak melewati batasan kapasitas saluran, walaupun kapasitas saluran bus 8 ke bus 2 menjadi lebih kecil, aliran daya pada saluran tidak melebihi 130 MW. Padahal dalam operasi pada kondisi normal aliran daya pada saluran bus 8 ke bus 2 lebih dari 130 MW. Dari hal tersebut maka dapat disimpulkan bahwa program yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan AC-SCOPF dengan batas keamanan sistem.

4.2.3 Pengujian Tahap 3

Pada pengujian ini akan diidentifikasi pengaruh dari *energy storage* atau yang selanjutnya disebut penyimpan energi ke sistem 9 bus IEEE. Pengujian penyimpan energi ini dilakukan terlebih dahulu selama 12 jam pada jam 1-12 sesuai dengan profil beban yang ditunjukkan pada gambar 4.3 untuk mengidentifikasi penyimpan energi ini dapat bekerja dengan baik atau tidak. Penyimpan energi yang biasa digunakan adalah baterai, dimana akan dilakukan pengujian tiga kondisi baterai sesuai data yang akan ditampilkan pada tabel 4.20 dan hasil simulasi *charging discharging* baterai akan ditampilkan pada gambar 4.4 , 4.5 dan 4.6. Setelah itu pada gambar 4.7 akan ditampilkan SOC dari baterai tersebut. Pada pengujian ini diibaratkan bahwa Sumber untuk pengisian baterai dianggap selalu ada, sehingga kapanpun baterai membutuhkan sumber untuk *charging* sumber tersebut dianggap selalu memenuhi.

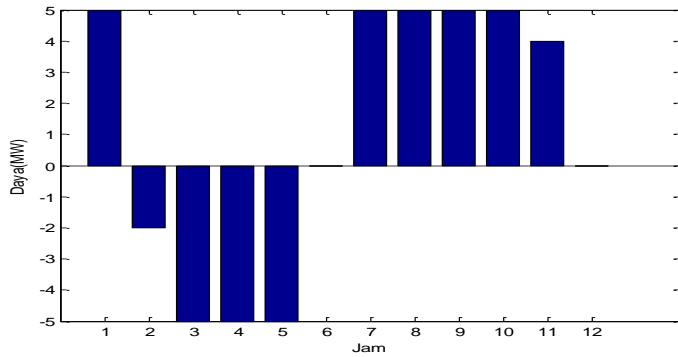


Gambar 4.3 Profil beban 24 jam

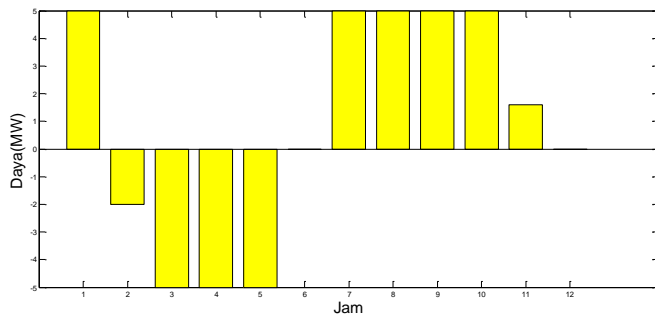
Tabel 4.20 Data baterai pada tiga kondisi

Kondisi	Baterai	Kapasitas (MWh)	SOC awal	SOC min	SOC max
1	B5	24	50%	0%	100%
2	B5	24	50%	10%	100%
3	B5	24	50%	20%	80%

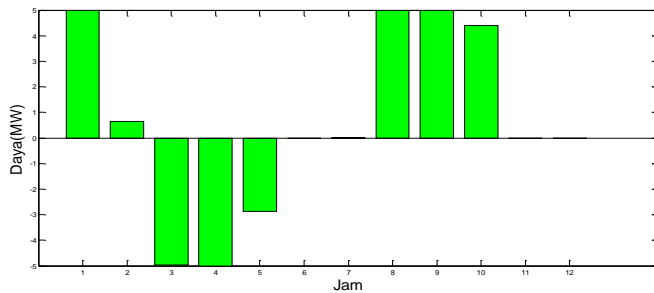




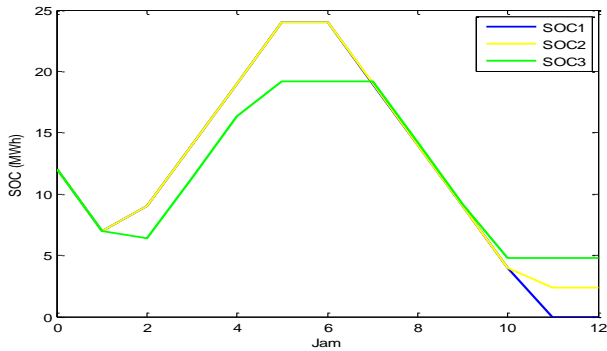
**Gambar 4.4** Daya pengeluaran penyimpan energi (1) tiap jam



**Gambar 4.5** Daya pengeluaran penyimpan energi (2) tiap jam



**Gambar 4.6** Daya pengeluaran penyimpan energi (3) tiap jam



**Gambar 4.7** SOC penyimpan energi pada tiap kondisi

#### 4.2.3.1 Analisis Pengujian Tahap 3

Dari hasil simulasi dapat dilihat cara kerja dari penyimpan energi. Penyimpan energi cenderung melakukan *charging* saat terjadi penurunan beban dan melakukan *discharging* saat terjadi kenaikan beban sesuai pada gambar 4.4 , gambar 4.5 dan gambar 4.6 . Dari gambar tersebut dapat diketahui pemberian batas  $SOC_{min}$  dan  $SOC_{max}$  dapat mempengaruhi kinerja baterai sebagai penyimpan energi pada setiap jamnya. Pada hasil simulasi juga didapat bahwa kerja dari penyimpan energi tidak melanggar batas operasinya, yaitu masih dalam batas  $SOC_{min}$  dan  $SOC_{max}$ , SOC baterai sebagai penyimpan energi tidak pernah kurang dari batas minimum dari  $SOC_{min}$  maupun melebihi dari batas maksimum  $SOC_{max}$  dari masing-masing percobaan. Dengan operasi seperti ini, penggunaan baterai sebagai penyimpan energi selalu berada dalam batas minimal dan maksimal. Maka dapat disimpulkan bahwa *sequential quadratic programming* yang dibuat mampu untuk melakukan perhitungan AC-SCOPF dengan adanya *energy storage*.

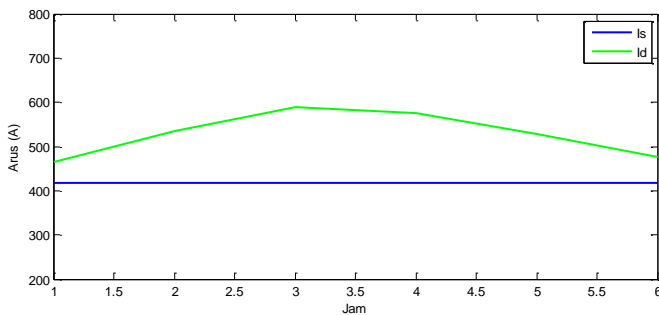
#### 4.2.4 Pengujian Tahap 4

Pengujian tahap 4 yaitu pengujian AC-SCOPF dengan penyimpan energi dengan batasan saluran dinamis. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan hasil perhitungan antara AC-SCOPF dengan penyimpan energi dengan rating saluran statis dan AC-SCOPF dengan penyimpan energi dengan rating saluran dinamis. Rating statis dihitung berdasarkan kondisi cuaca terburuk yaitu saat kecepatan angin rendah dan suhu lingkungan tinggi. Pada pengujian ini, untuk kondisi statis menggunakan

kondisi cuaca dengan kecepatan angin = 0 m/s dan suhu lingkungan 40°C. Kecepatan angin = 0 m/s dipilih karena merupakan kondisi terburuk dan sering terjadi. Sedangkan untuk suhu lingkungan 40°C dipilih berdasarkan pada referensi [3] dan juga karena merupakan kondisi suhu yang tinggi. Sementara rating saluran dinamis menggunakan kondisi cuaca yang berubah-ubah sesuai yang ditunjukkan tabel 4.21. Dengan kecepatan angin dipilih nilai yang lebih besar dari kondisi statis sedangkan suhu lingkungan dipilih nilai yang lebih kecil dibandingkan kondisi statis. Hasil simulasi akan ditampilkan pada tabel 4.22 dan 4.23 serta pada gambar 4.8 dan 4.9.

**Tabel 4.21** Kapasitas saluran dinamis dari case IEEE 9 bus

T	Qc (W/m)	Qr (W/m)	Vw (m/s)	Ta (°C)	Id/Is	Is	Id
1	57	41.5	0.8	37	1.1124	418.3	465.4
2	82.3	42.6	0.93	35	1.2797	418.3	535.4
3	105.6	43.97	1.05	33	1.4101	418.3	589.9
4	98.7	42.8	1	36	1.3773	418.3	576.2
5	80.5	44.5	0.9	38	1.2613	418.3	527.7
6	61.4	43	0.82	35	1.1409	418.3	477.3



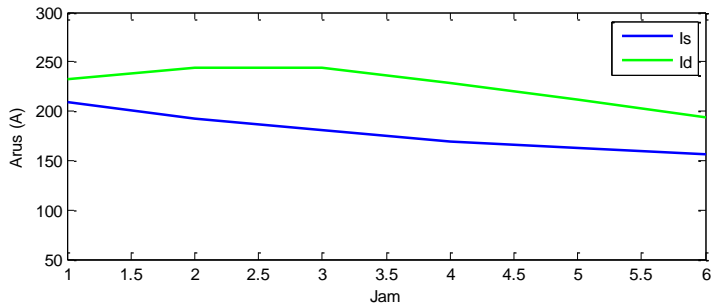
**Gambar 4.8** Kapasitas saluran pada bus 8 ke bus 2 untuk saluran statis dan dinamis pada setiap jam

**Tabel 4.22** Kapasitas saluran statis dan dinamis pada setiap jam

<b>Statis</b>	<b>Rating Saluran Dinamis Jam ke-</b>					
Jam 1-6	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>418.4</b>	465.4	535.4	590	576.2	527.7	477.3
<b>418.4</b>	465.4	535.4	590	576.2	527.7	477.3
<b>251</b>	279.3	321.2	354	345.7	316.6	286.4
<b>502</b>	558.5	642.5	708	691.5	633.3	572.8
<b>251</b>	279.3	321.2	354	345.7	316.6	286.4
<b>418.4</b>	465.4	535.4	590	576.2	527.7	477.3
<b>418.4</b>	465.4	535.4	590	576.2	527.7	477.3
<b>167.3</b>	186.2	214.2	236	230.5	211.1	190.9
<b>418.4</b>	465.4	535.4	590	576.2	527.7	477.3

**Tabel 4.23** Total biaya pembangkitan pada rating saluran statis dan dinamis pada setiap jam

<b>Jam ke-</b>	<b>Biaya total Pembangkitan</b>	
	Dinamis	Statis
<b>1</b>	8334.1	8475.7
<b>2</b>	9000.3	9425.7
<b>3</b>	9350.4	9925.6
<b>4</b>	9060	9631.8
<b>5</b>	8760.6	9260.2
<b>6</b>	8329.4	8748.7



**Gambar 4.9** Arus pada saluran dari bus 8 ke bus 2 untuk saluran statis dan dinamis pada setiap jam

#### 4.2.4.1 Analisa Pengujian Tahap 4

Pada pengujian ini akan dilakukan analisis pada profil beban dari kondisi 7 sampai kondisi 12 yaitu 6 jam. Dari hasil simulasi didapat, rating saluran dinamis dipengaruhi berdasarkan dari kondisi cuaca yang berubah-ubah. Dimana, semakin besar kecepatan angin dapat membuat rating saluran semakin besar sedangkan suhu lingkungan yang semakin tinggi dapat membuat rating saluran menjadi lebih kecil. Pada tabel 4.22 dapat dilihat bahwa rating saluran dinamis mempunyai nilai yang lebih besar dibandingkan dengan rating saluran statis. Pada Gambar 4.9 diperlihatkan bahwa arus yang mengalir pada rating saluran dinamis lebih besar dari pada arus yang mengalir pada rating saluran statis. Sehingga, rating saluran yang lebih besar membuat saluran transmisi lebih bisa digunakan dalam memenuhi kebutuhan beban serta biaya perhitungan AC-SCOPF dengan penyimpan energi dengan rating saluran dinamis menghasilkan biaya lebih murah sesuai dengan tabel 4.23.

### 4.3 Simulasi IEEE Sistem 14 Bus

Sistem IEEE 14 Bus terdiri dari lima pembangkit *thermal* yang memiliki spesifikasi *ramp rate*, kapasitas maksimal pembangkit dan juga koefisien biaya pembangkit sesuai pada tabel 4.24. Pembangkit-pembangkit tersebut merupakan sumber utama dalam menyuplai beban. Selain pembangkit terdapat tambahan *battery energy storage* yang akan ditambahkan pada sistem untuk melihat pengaruhnya terhadap pembangkitan. *Battery energy storage* dipilih karena kemampuan yang dapat melakukan *charging* dan *discharging* tanpa ada batasan *ramp rate* seperti pada pembangkit *thermal*, sehingga diharapkan dapat membantu operasi pembangkit, khususnya pada saat terjadi kontingensi.

Pada sistem ini *battery energy storage* yang akan ditambahkan berjumlah dua unit dan diletakan secara tersebar pada sistem seperti pada gambar 4.10. Penempatan lokasi dari *energy storage* ini diletakkan pada beban yang jauh dari generator dan memiliki daya yang besar. Data baterai akan ditampilkan pada tabel 4.25. Selain itu akan ditambahkan data saluran pada tabel 4.26 dan 4.27 serta data beban pada *case 14* pada tabel 4.28. Serta pada tabel 4.29 akan ditampilkan data rating saluran dinamis.

Pada simulasi IEEE 14 bus ini akan dilakukan beberapa pengujian untuk melihat pengaruh kondisi kontingensi, pengaruh penyimpan energi serta pengaruh adanya rating saluran dinamis pada sistem. Pengujian ini akan dilakukan selama 12 jam yang ditampilkan pada tabel 4.30 sesuai pada profil beban pada gambar 4.11. Pengujian akan dilakukan dengan dua kali pengujian. Dimana pada setiap pengujian diberikan kondisi-kondisi yang berbeda untuk melihat pengaruh penyimpan energi dengan rating saluran dinamis pada operasi sistem tenaga listrik.

**Tabel 4.24** Data pembangkit pada IEEE case 14 bus

No.	Cost Function	Pmax (MW)	Pmin (MW)	Ramprate
1	$0.04303P_1^2 + 20P_1$	324.5	10	30
2	$0.25P_2^2 + 20P_2$	140	10	40
3	$0.1225P_3^2 + 40P_3$	100	10	35
4	$0.01P_4^2 + 40P_4$	40	10	35
5	$0.01P_5^2 + 40P_5$	40	10	35

**Tabel 4.25** Data baterai pada IEEE case 14 bus

Baterai	B1	B2
Bus	9	13
Kapasitas(MWh)	30	24
SOC Awal(%)	50	50
SOCmin (%)	10	10
SOCmax (%)	90	90
Pcharging max(MW)	6	5
Pdischarging max(MW)	6	5



**Tabel 4.27** Data kapasitas saluran pada IEEE case 14 bus (lanjutan)

<b>From Bus</b>	<b>To Bus</b>	<b>Kapasitas(MVA)</b>
7	9	200
9	10	200
9	14	150
10	11	150
12	13	250
13	14	250

**Tabel 4.28** Data beban pada IEEE case 14 bus

<b>Bus</b>	<b>Pd(MW)</b>	<b>Qd(MVAR)</b>
1	0	0
2	21.7	12.7
3	94.2	19
4	47.8	-3.9
5	7.6	1.6
6	11.2	7.5
7	0	0
8	0	0
9	29.5	16.6
10	9	5.8
11	3.5	1.8
12	6.1	1.6
13	13.5	5.8
14	14.9	5

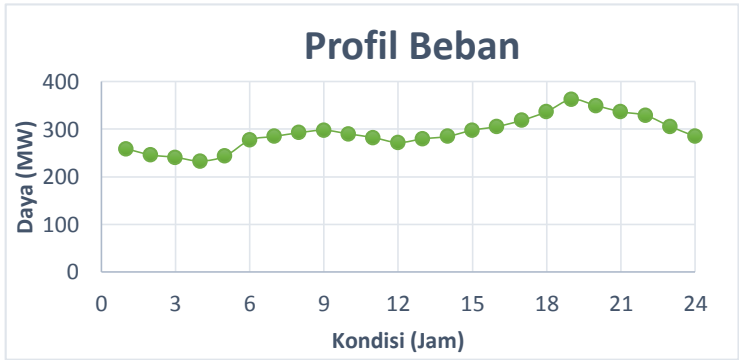


Tabel 4.29 Data rating saluran dinamis

jam ke-	Qc (W/m)	Qr (W/m)	Ta (°C)	Vw (m/s)	Is	Id/Is	Id
1	57	41.5	37	0.8	427	1.112	475
2	70.65	42.6	35	0.93	427	1.204	515
3	82.3	43.97	33	1.05	427	1.274	545
4	98.7	45	36	1.08	427	1.366	584
5	100.02	44.5	38	1.1	427	1.376	588
6	102.37	43	35	1.2	427	1.397	597
7	98.6	43.54	33	0.9	427	1.372	587
8	89.56	48.75	32	0.82	427	1.298	555
9	80.07	47.65	31	0.76	427	1.247	533
10	74.32	46.5	29	0.7	427	1.216	520
11	65.02	45.3	30	0.65	427	1.160	496
12	60	42.34	31	0.64	427	1.132	484

Tabel 4.30 Data beban 12 jam

Jam Ke-	1	2	3	4	5	6
Beban (MW)	277.13	284.9	292.67	297.85	290.08	282.31
Jam Ke-	7	8	9	10	11	12
Beban (MW)	271.95	279.7	284.9	297.85	305.62	318.57



Gambar 4.11 Profil beban 24 jam

#### 4.3.1 Pengujian Pertama

Pada pengujian pertama IEEE 14 bus ini akan dilakukan empat kondisi berbeda. Pada pengujian ini akan dilakukan selama 12 jam dan yang diambil pada jam-6 sampai jam-17 dimana kondisi yang akan ditampilkan sebagai berikut :

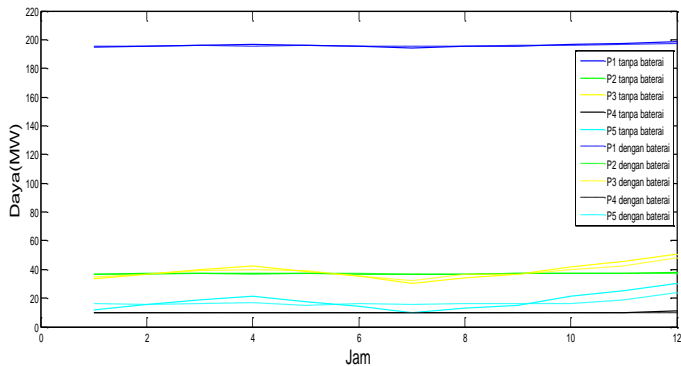
kondisi 1 : kondisi normal OPF tanpa *energy storage*

kondisi 2 : kondisi normal SCOPF dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 tanpa *energy storage*

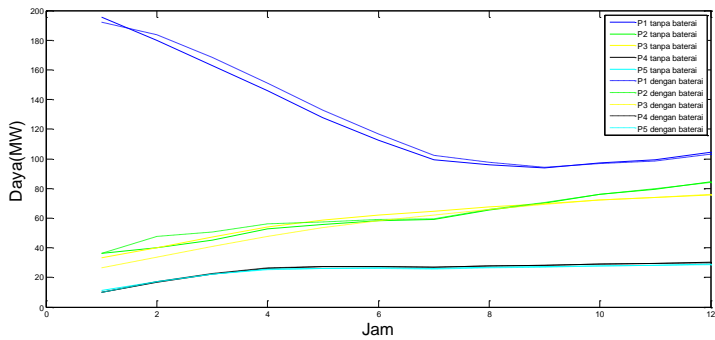
kondisi 3 : kondisi normal OPF dengan *energy storage*

kondisi 4 : kondisi normal SCOPF dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 dengan *energy storage*

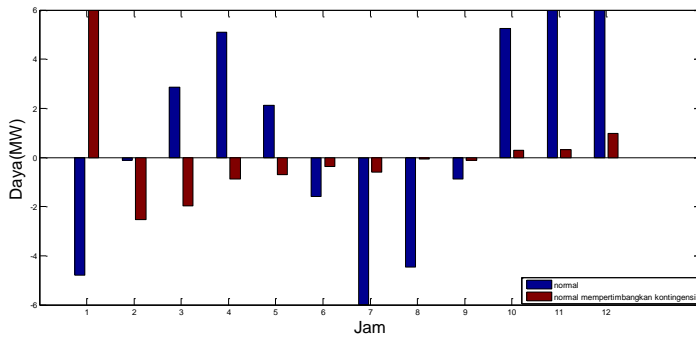
Hasil simulasi yang akan ditampilkan yaitu kondisi pembangkitan daya di generator pada gambar 4.12 dan 4.13. Proses charging discharging baterai pada kondisi ketiga dan keempat pada gambar 4.14 dan 4.15. Biaya pembangkitan pada gambar 4.16. Biaya total pembangkitan 12 jam pada tabel 4.30



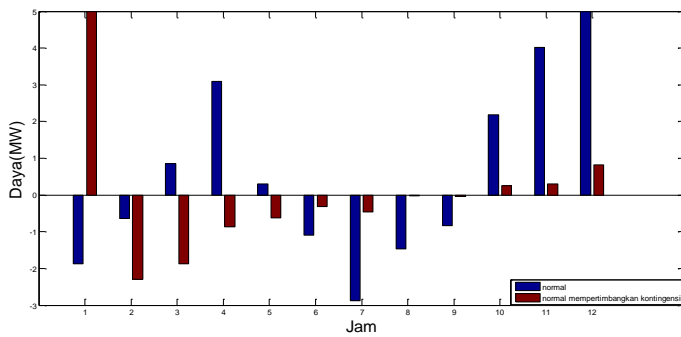
**Gambar 4.12** Daya output generator kondisi 1 dan kondisi 3



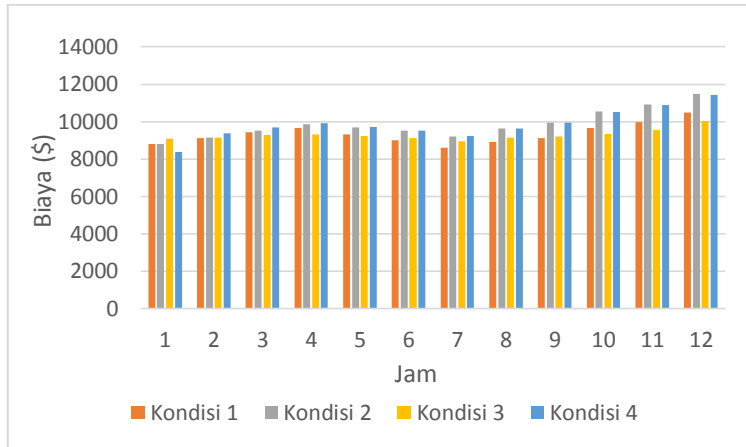
**Gambar 4.13** Daya output generator kondisi 2 dan kondisi 4



**Gambar 4.14** Charging dan discharging baterai 1



**Gambar 4.15** Charging dan discharging baterai 2



**Gambar 4.16** Biaya pembangkitan pada setiap jam di kondisi 1-4

**Tabel 4.31** Total biaya pembangkitan pada kondisi 1-4

Total Biaya Keseluruhan	
Kondisi 1	112147.0593 \$/hr
Kondisi 2	118326.2990 \$/hr
Kondisi 3	111483.7224 \$/hr
Kondisi 4	118305.2126 \$/hr

#### 4.3.1.1 Analisis Pengujian Pertama

Pada pengujian ini dapat dilihat pada tabel 4.31 bahwa aliran daya optimal dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 memiliki harga lebih mahal 5,5% dibandingkan dengan dengan aliran daya optimal tanpa mempertimbangkan kontingensi. Hal ini dikarenakan daya yang dibangkitkan generator pertama mengalami penurunan drastis dikarenakan agar pada saat kontingensi tidak melebihi batasan ramp rate yang diberikan. Penambahan *energy storage* dapat mempengaruhi operasi dari pembangkitan sistem dan dapat mempengaruhi total biaya pembangkitan. Dari hasil simulasi diatas didapat kondisi *charging* sama *discharging* pada baterai *energy storage*. Pada kondisi 3 didapat *charging* dan *discharging* sampai batas dari dari SOCmin dan SOCmax yang diberikan. Tetapi pada kondisi 4 baterai sebagai *energy storage* lebih

cenderung melakukan charging agar pada saat terjadi kontingensi baterai dapat melakukan *discharge*. *Charging* dan *discharging* baterai pada kondisi 4 lebih kecil dibandingkan pada kondisi 3 seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.14 dan 4.15. Biaya operasi dengan pemberian *energy storage* pada kondisi 3 lebih murah 0,6% dari kondisi 1. Sedangkan penggunaan *energy storage* pada kondisi 4 lebih murah 0,02% dari pada saat kondisi 2. Sehingga dengan hasil yang dipaparkan dapat disimpulkan bahwa dengan adanya *energy storage* dapat mengurangi biaya operasional dari pembangkitan dan penambahan *energy storage* juga dapat mengurangi nilai puncak dari pembangkitan pada generator.

#### 4.3.2 Pengujian Kedua

Pada pengujian kedua IEEE sistem 14 bus ini akan dilakukan enam kondisi berbeda. Pada pengujian ini akan dilakukan selama 12 jam dan yang diambil pada jam-6 sampai jam-17 dimana kondisi yang akan ditampilkan sebagai berikut :

kondisi 1 : kondisi normal SCOPF dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 tanpa *energy storage*

kondisi 2 : kondisi kontingensi SCOPF pada saluran 1-2 tanpa *energy storage*

kondisi 3 : kondisi normal SCOPF dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 dengan *energy storage*

kondisi 4 : kondisi kontingensi SCOPF pada saluran 1-2 dengan *energy storage*

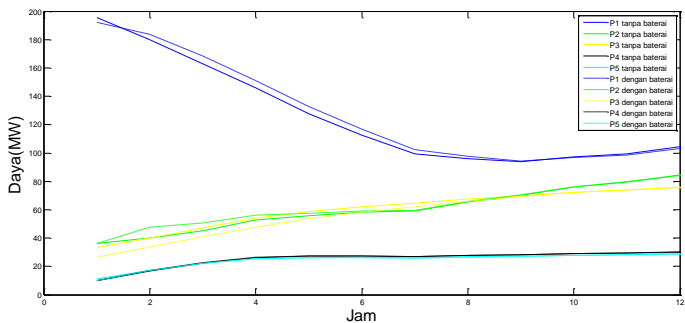
kondisi 5 : kondisi normal SCOPF dengan mempertimbangkan kontingensi pada saluran 1-2 dengan *energy storage* dan *dynamic line rating*

kondisi 6 : kondisi kontingensi SCOPF pada saluran 1-2 dengan *energy storage* dan *dynamic line rating*

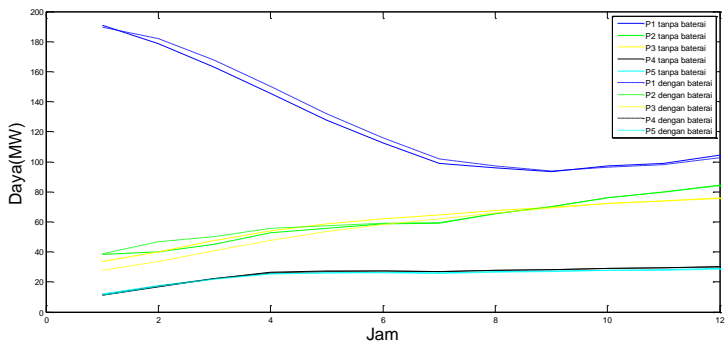
Hasil simulasi yang akan ditampilkan yaitu tabel 4.31 daya output dari generator dan *energy storage* . Kondisi pembangkitan daya di generator pada gambar 4.17-4.20. Kapasitas arus pada saluran 1-2 pada gambar 4.21. Tabel 4.32 arus saluran 1-2 pada kondisi 1-4. Tabel 4.33 arus saluran 1-2 pada kondisi 3-6. Gambar 4.22 arus saluran 1-2 pada tiap jam di kondisi 3 dan 5. Biaya pembangkitan pada gambar 4.23 dan 4.24. Serta pada gambar 4.25 dan 4.26 diperlihatkan SOC dari baterai 1 dan 2. Biaya total pembangkitan 12 jam pada tabel 4.34

Tabel 4.31 Daya output generator dan *energy storage* pada jam ke-10

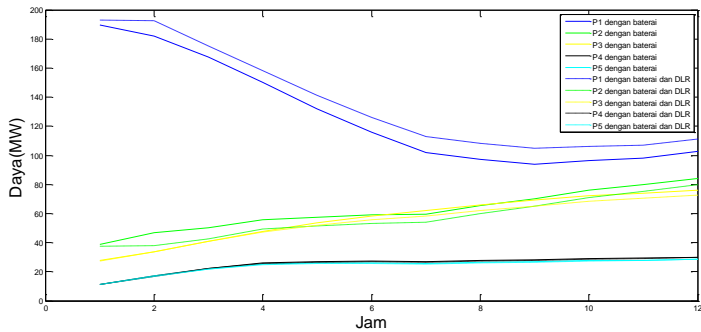
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	ket
G1 (MW)	97.17	97.1	96.73	96.34	106.63	106.3	Sesuai
G2 (MW)	75.91	75.95	76.22	76.06	71.31	71.18	Sesuai
G3 (MW)	72.12	72.14	72.17	72.14	68.26	68.23	Sesuai
G4 (MW)	29.15	29.15	28.93	28.88	28.55	28.51	Sesuai
G5 (MW)	27.92	27.93	27.67	27.63	27.32	27.28	Sesuai
B1 (MW)	-	-	0.28	0.57	0.29	0.52	Sesuai
B2 (MW)	-	-	0.26	0.6	0.26	0.58	Sesuai



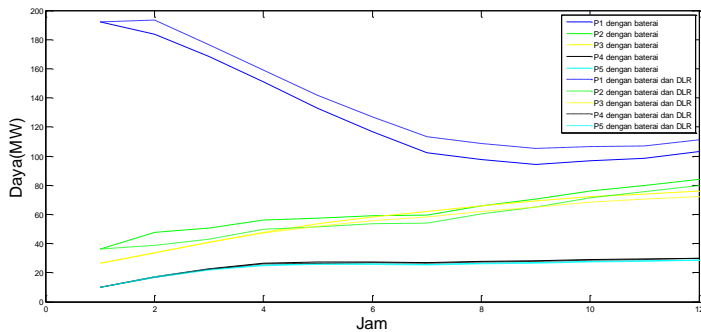
Gambar 4.17 Daya output generator pada kondisi 1 dan kondisi 3



Gambar 4.18 Daya output generator pada kondisi 2 dan kondisi 4



**Gambar 4.19** Daya output generator pada kondisi 3 dan kondisi 5



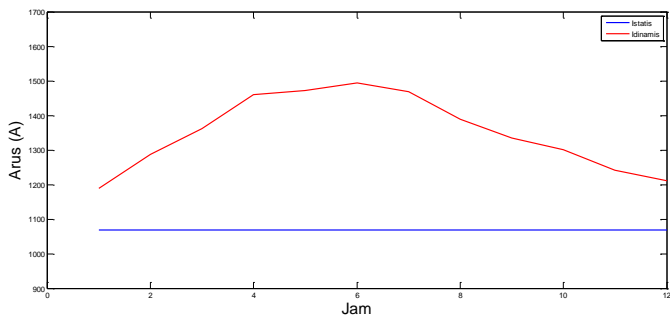
**Gambar 4.20** Daya output generator pada kondisi 4 dan kondisi 6

**Tabel 4.32** Arus saluran 1-2 pada kondisi 1-4 jam ke-10

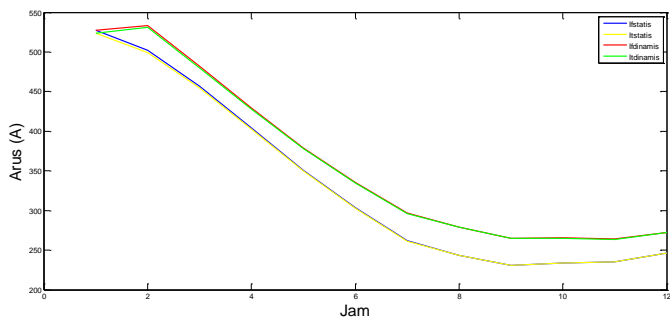
	K1	K2	K3	K4	Ket
If (A)	234.74	234.5	233.69	232.46	Sesuai
It (A)	235.46	235.18	233.61	233.22	Sesuai

**Tabel 4.33** Arus saluran 1-2 pada kondisi 3-6 jam ke-10

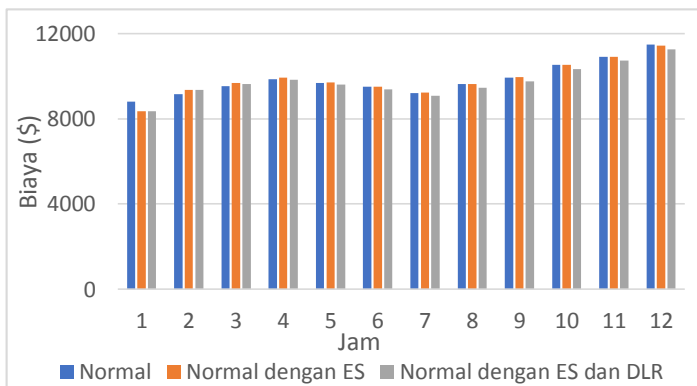
	K3	K4	K5	K6	Ket
If (A)	233.69	232.46	265.3	264.35	Sesuai
It (A)	233.61	233.22	265.04	264.49	Sesuai



**Gambar 4.21** Kapasitas saluran 1-2 statis dan dinamis pada setiap jam

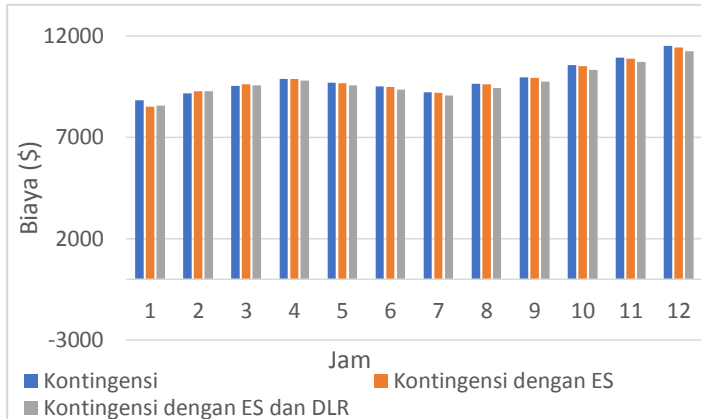


**Gambar 4.22** Arus saluran 1-2 setiap jam pada kondisi 3 dan 5

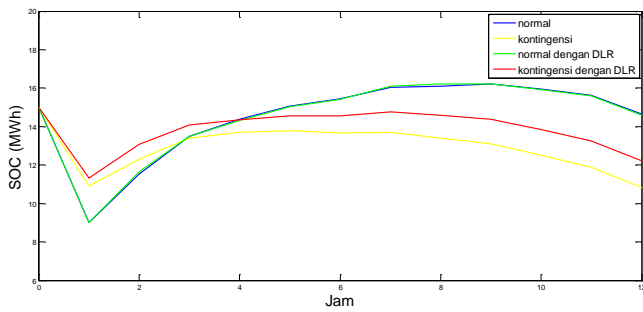


**Gambar 4.23** Biaya operasi setiap jam pada kondisi 1,3 dan 5

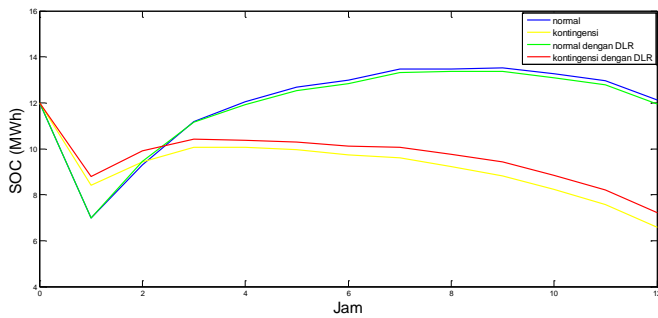




**Gambar 4.24** Biaya operasi setiap jam pada kondisi 2,4 dan 6



**Gambar 4.25** SOC pada baterai 1



**Gambar 4.26** SOC pada baterai 2

**Tabel 4.34** Total biaya pembangkitan selama 12 jam

Biaya Total Pembangkitan		Keterangan
K1	118326.2990 \$/hr	Sesuai
K2	118352.2884 \$/hr	Sesuai
K3	118305.2126 \$/hr	Sesuai
K4	117935.4012 \$/hr	Sesuai
K5	116852.8721 \$/hr	Sesuai
K6	116582.2899 \$/hr	Sesuai

#### 4.3.2.1 Analisis Pengujian Kedua

Pada tabel 4.31 dapat dilihat bahwa penambahan energi storage dapat *redispatch* generator hingga 0,45%. Hal ini dikarenakan *discharge* dari baterai yang membantu mengalirkan daya kepada pelanggan. Hal ini juga sesuai dengan gambar 4.17 sampai gambar 4.18 yang memperlihatkan dengan adanya *energy storage* dapat mengatur distpach generator menjadi lebih kecil atau lebih besar dari semula dikarenakan oleh efek *charging* dan *discharging* baterai, sehingga dengan adanya *energy storage* dapat mengurangi puncak dari pembangkitan yang ada pada generator. Pada tabel 4.31 dapat terlihat dengan adanya *dynamic thermal line rating* dapat menaikkan *redispatch* generator hingga 10% dari pembangkitan dengan *energy storage* biasa. Hal ini karena dengan adanya *dynamic line rating* rating dari saluran menjadi bertambah dan dapat mengalirkan daya yang lebih besar dibandingkan daya sebelumnya pada generator utama.

Pada tabel 4.32 dapat dilihat bahwa penambahan *energy storage* juga mempengaruhi saluran yang mengalir pada sistem. Dikarenakan letak *energy storage* yang dekat dengan beban sehingga arus yang mengalir dari saluran dengan total beban yang sama menjadi lebih kecil 0,45% saat normal dan 0,87% saat kontingensi. Hasil yang didapat pada saat kontingensi lebih besar dikarenakan *energy storage* lebih cenderung melakukan *discharging* seperti yang telah diperlihatkan pada gambar 4.25 dan 4.26. Perhitungan *dynamic line rating* juga mempengaruhi pada sistem tenaga, dinama dengan adanya *dynamic line rating* kapasitas saluran lebih besar sehingga daya yang dapat diberikan pada generator lebih tinggi pada beban yang sama. Terlihat pada tabel 4.33 dimana arus saluran pada rating saluran dinamis menjadi lebih besar dibandingkan pada saat statis. Pada saat kondisi normal arus saluran dinamis dapat

mengirimkan arus hingga 13,5% lebih besar dari pada saat salurannya dinamis serta pada saat kontingensi arus saluran dinamis dapat mengirimkan arus hingga 13,7% lebih besar dari pada saat kontingensi dengan saluran statis. Pada gambar 4.22 juga terlihat bahwa dengan adanya rating saluran dinamis maka kapasitas arus yang dikirimkan akan semakin besar pada setiap jamnya. Pada saat rating saluran dinamis juga mempengaruhi SOC dari *energy storage*, dimana pada jam pertama *energy storage* melakukan *discharge* yang lebih besar dan pada setelah itu SOC dari *energy storage* lebih besar dari pada dengan rating saluran statis. Hal ini terjadi dikarenakan kapasitas saluran yang semakin besar, sehingga generator mampu mengirimkan daya yang lebih besar yang membuat *energy storage* melakukan *charging* lebih besar dan *discharging* lebih kecil dari pada saat rating salurannya statis seperti yang diperlihatkan pada gambar 4.25 dan 4.26.

Pada gambar 4.23 dan 4.24 dapat dilihat biaya operasi sistem pada setiap jam, dimana biaya paling murah terdapat pada sistem dengan *energy storage* dan *dynamic line rating* serta biaya yang paling mahal pada saat sistem tidak dipasang *energy storage* ataupun dengan perhitungan *dynamic line rating*. Pada tabel 4.34 terlihat total biaya pada setiap jam dikondisi 1-6. Dimana pada saat kondisi normal yaitu kondisi 1,3 dan 5, biaya operasi menjadi lebih murah sebesar 0,02% dengan penambahan *energy storage* serta biaya operasi menjadi jauh lebih murah sebesar 1,25% dengan penambahan *energy storage* dan *dynamic thermal line rating*. Hal yang serupa didapat pada kondisi kontingensi yaitu pada kondisi 2,4 dan 6, biaya operasi menjadi lebih murah sebesar 0,35% dengan penambahan *energy storage* serta biaya operasi menjadi jauh lebih murah sebesar 1,5% dengan penambahan *energy storage* dan *dynamic thermal line rating*.

Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa SCOPF dengan *energy storage* dan *dynamic thermal line rating* dapat menyelesaikan permasalahan aliran daya optimal dengan memberikan biaya yang lebih murah dibandingkan dengan SCOPF biasa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan dari simulasi dan analisis yang telah dilakukan, didapat beberapa kesimpulan yaitu,

1. Aliran daya optimal mempertimbangkan batas keamanan memiliki harga yang lebih besar dibandingkan dengan aliran daya optimal tanpa mempertimbangkan batas keamanan.
2. Penggunaan baterai sebagai *energy storage* mampu menambah keandalan sistem, dimana dengan adanya *energy storage* total biaya operasi menjadi lebih murah.
3. Pemberian SOCmin dan SOCmax pada baterai dalam penggunaannya dapat menambah umur baterai sebagai *energy storage*.
4. Penggunaan baterai sebagai *energy storage* dapat mempengaruhi saluran pada sistem, dimana dengan beban yang sama dapat arus yang mengalir pada saluran menjadi lebih kecil.
5. Dengan penambahan *dynamic line rating* kapasitas saluran menjadi lebih besar, sehingga dapat mengalirkan daya lebih optimal dibandingkan dengan rating saluran yang statis.
6. Dengan adanya *energy storage* dan *dynamic line rating* ini biaya operasi menjadi lebih murah dibandingkan dengan SCOPF biasa dan dapat menjadi solusi untuk mengoptimalkan aliran daya dari pembangkit ke pelanggan (beban).

#### **5.2 Saran**

Berdasarkan dari analisis yang dilakukan, peneliti memberikan saran sebagai berikut :

1. Diharapkan penelitian selanjutnya diharapkan untuk memperhitungkan kondisi cuaca secara real yang terjadi di Indonesia dalam penentuan *charging discharging* baterai dan perhitungan *dynamic line rating*.
2. Diharapkan penelitian selanjutnya mempertimbangkan investasi penyimpanan energi dan biaya *maintenance*.
3. Diharapkan peneliti selanjutnya dapat mencoba metode ini menggunakan plan yang nyata, sehingga metode ini dapat digunakan dalam penyelesaian studi aliran daya optimal.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. J. Granger-Stevenson, "<Power system analysis E-1.pdf>," 1994.
- [2] R. Seto, T. Prasetya, O. Penangsang, and A. Soeprijanto, "<Security constrained optimal power flow incorporating preventive and corrective control.pdf>," 2014.
- [3] I. S. 738<sup>TM</sup>-2012, "<IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors.pdf>," 2013.
- [4] R. Seto, K. R. F., N. K. Aryani, and A. Soeprajitno, "<Dynamic Economic Dispatch of Hybrid Microgrid With Energy Storage Using Quadratic Programming.pdf>," 2016.
- [5] Y. Bagus, R. Seto, and D. Anton, "<Aliran Daya Optimal dengan Batas Keamanan Sistem Mempertimbangkan Energy Storage>," Bachelor, Electrical Engineering, Institut Sepuluh Nopember, Juni 2017.
- [6] T. Gonen, "Electrical power transmission system engineering \_ analysis and design.pdf>," CRC Press 2014.
- [7] H. Saadat, <Power System Analysis .pdf>, 2010.
- [8] L. Dawson and A. Knight, "Applicability of Dynamic Thermal Line Rating for Long Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1-1, 2017.
- [9] W.-Q. Sun, C.-M. Wang, P. Song, and Y. Zhang, "Flexible load shedding strategy considering real-time dynamic thermal line rating," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, pp. 130-137, 2013.
- [10] G. Haddadian, N. Khalili, M. Khodayar, and M. Shahidehpour, "Optimal scheduling of distributed battery storage for enhancing the security and the economics of electric power systems with emission constraints," *Electric Power Systems Research*, vol. 124, pp. 152-159, 2015.
- [11] N. Sugiantoro, R. Seto, and V. Lystianingrum, "SECURITY CONSTRAINED OPTIMAL POWER FLOW WITH DYNAMIC THERMAL LINE RATING," Bachelor, Electrical Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [12] S. Sivasubramani and K. S. Swarup, "Sequential quadratic programming based differential evolution algorithm for optimal power flow problem," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, p. 1149, 2011.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## LAMPIRAN

1. Data keluaran pembangkit kondisi normal tanpa mempertimbangkan kontingensi dan *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam ke-	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	194.91	36.87	33.18	10	11.56
2	195.55	37	36.43	10	15.35
3	196.4	37.17	39.72	10	18.88
4	196.77	37.24	42.12	10	21.24
5	196.1	37.11	38.74	10	17.61
6	195.36	36.96	35.37	10	14.03
7	194.18	36.73	30.36	10	10
8	195.17	36.92	34.24	10	12.78
9	195.59	37.01	36.58	10	15.15
10	196.86	37.26	41.99	10	21.27
11	197.52	37.39	45.41	10	24.89
12	198.71	37.63	50.67	10.92	30.35

2. Daya keluaran pembangkit kondisi normal dengan *energy storage* tanpa mempertimbangkan kontingensi sistem IEEE 14 bus

Jam ke-	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	195.35	36.95	34.81	10	16.11
2	195.62	36.94	36.89	10	15.64
3	195.89	37.24	38.95	10	16.32
4	195.67	36.97	39.56	10	16.87
5	196.21	37.04	39.1	10	14.76
6	195.71	37.11	35.26	10	16.39
7	195.37	36.94	32.26	10	15.7
8	195.26	36.87	36.66	10	16.24
9	195.86	37.06	36.61	10	16.53

3. Daya keluaran pembangkit kondisi normal dengan mempertimbangkan kontingensi tanpa penyimpanan energi untuk sistem IEEE 14 bus (lanjutan)

Jam ke-	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
10	196.28	37.08	40.04	10	16.48
11	196.46	37.35	42.5	10	18.77
12	197.57	37.35	48.29	10.01	23.9

4. Daya keluaran pembangkit kondisi normal dengan mempertimbangkan kontingensi tanpa *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	195.59	36.43	33.14	10.04	11.35
2	179.71	39.87	40.12	16.55	17.25
3	163.1	45.15	47.44	22.27	22.26
4	145.78	52.84	54.01	26.26	25.57
5	127.92	55.66	58.67	27.16	26.16
6	112.56	58.41	62.19	27.43	26.35
7	99.18	59.24	64.43	27.06	25.97
8	95.93	65.51	67.46	27.95	26.84
9	93.72	70.05	69.68	28.33	27.17
10	97.17	75.91	72.12	29.15	27.92
11	99.16	79.63	73.77	29.52	28.22
12	104.58	84.37	75.48	30.34	29

5. Daya keluaran pembangkit kondisi kontingensi tanpa *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	191.01	38.45	33.54	11.26	12.15
2	178.7	40.17	40.23	16.83	17.49
3	162.97	45.09	47.47	22.36	22.33

6. Daya keluaran pembangkit kondisi kontingensi tanpa *energy storage* sistem IEEE 14 bus (lanjutan)

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
4	145.51	52.93	54.07	26.31	25.61
5	127.7	55.76	58.72	27.19	26.18
6	112.41	58.49	62.23	27.45	26.37
7	99.06	59.29	64.45	27.07	25.98
8	95.83	65.57	67.48	27.96	26.85
9	93.64	70.06	69.69	28.34	27.18
10	97.1	75.95	72.14	29.15	27.93
11	99.1	79.68	73.78	29.52	28.23
12	104.51	84.41	75.5	30.34	28.99

7. Daya keluaran pembangkit kondisi normal dengan *energy storage* mempertimbangkan kontingensi untuk sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	192.34	36.39	26.59	10	10
2	183.77	47.48	33.77	17.08	17.03
3	168.6	50.81	40.83	22.5	22.1
4	151.21	56.15	47.77	26.28	25.38
5	133.01	57.58	53.57	27.16	26.03
6	116.73	59.25	58.4	27.36	26.2
7	102.5	59.74	62.08	26.98	25.83
8	97.58	65.75	66.09	27.8	26.64
9	94.31	70.43	69.22	28.18	26.98
10	96.73	76.22	72.17	28.93	27.67
11	98.31	79.92	74.14	29.29	27.97
12	103.05	84.28	75.86	30.01	28.65

8. Daya keluaran pembangkit kondisi kontingensi dengan *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	189.77	38.75	27.6	11.24	11.25
2	181.89	46.87	33.65	17.04	16.99
3	167.58	50.07	40.68	22.37	21.95
4	150.41	55.67	47.7	26.19	25.27
5	132.2	57.21	53.51	27.07	25.93
6	116.06	58.98	58.36	27.29	26.13
7	101.82	59.43	62.02	26.91	25.75
8	97.09	65.56	66.06	27.75	26.59
9	93.81	70.21	69.17	28.12	26.92
10	96.34	76.06	72.14	28.88	27.63
11	97.92	79.76	74.1	29.24	27.92
12	102.86	84.25	75.87	29.99	28.63

9. Daya keluaran pembangkit kondisi normal dengan *energy storage* dan DLR mempertimbangkan kontingensi untuk sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	192.35	36.39	26.58	10	10
2	193.51	38.96	33.85	16.8	16.73
3	176.28	43.17	41.02	22.35	21.94
4	159.04	49.83	47.25	25.86	25
5	141.83	51.68	51.88	26.67	25.62
6	126.77	53.5	55.6	26.79	25.72
7	113.46	54.13	58.42	26.36	25.29
8	108.84	60.19	62.07	27.17	26.08
9	105.15	65.13	65.15	27.64	26.49
10	106.63	71.31	68.26	28.55	27.32
11	107.14	75.47	70.51	29.05	27.75
12	111.23	80.05	72.45	29.88	28.53

10. Daya keluaran pembangkit kondisi kontingensi dengan *energy storage* dan DLR sistem IEEE 14 bus

Jam ke -	Unit 1	Unit 2	Unit 3	Unit 4	Unit 5
1	192.94	37.44	27.16	11.18	11.17
2	192.74	37.8	33.65	16.75	16.67
3	175.26	42.43	40.91	22.25	21.82
4	158.24	49.39	47.19	25.78	24.91
5	141.15	51.32	51.83	26.59	25.54
6	126.27	53.23	55.56	26.73	25.66
7	112.91	53.83	58.35	26.29	25.22
8	108.46	60.01	62.04	27.13	26.03
9	104.73	64.92	65.1	27.59	26.44
10	106.3	71.18	68.23	28.51	27.28
11	106.78	75.33	70.48	29.01	27.71
12	111.05	80.03	72.46	29.87	28.52

11. Kapasitas saluran 1-2 statis dan dinamis sistem IEEE 14 bus

Jam Ke-	Is	Id
1	1069.2	1189.4
2	1069.2	1288.1
3	1069.2	1362.6
4	1069.2	1460.8
5	1069.2	1471.4
6	1069.2	1494
7	1069.2	1467.9
8	1069.2	1388.4
9	1069.2	1334.2
10	1069.2	1300.8
11	1069.2	1240.7
12	1069.2	1210.8

12. Saluran 1-2 statis tanpa *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam Ke-	Kondisi Normal		Kondisi Kontingensi	
	If(A)	It(A)	If(A)	It(A)
1	532.97	529.48	524.45	520.6
2	493.29	491.14	492.89	489.51
3	442.48	441.27	445.74	443.09
4	388.83	388.13	389	387.5
5	336.23	335.93	335.63	335.1
6	290.66	290.68	290.11	290.13
7	251.63	252.37	251.29	251.71
8	238.21	239.04	237.87	238.67
9	228.88	229.75	228.6	229.43
10	234.74	235.46	234.5	235.18
11	237.83	238.44	237.59	238.17
12	250.11	250.46	249.88	250.22

13. Saluran 1-2 statis dengan *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam Ke-	Kondisi Normal		Kondisi Kontingensi	
	If(A)	It(A)	If(A)	It(A)
1	527.07	523.67	517.46	514.94
2	501.85	499.03	497.43	494
3	456.78	454.62	458.55	455.38
4	404.19	402.6	403.34	401.34
5	351.03	349.88	348.86	348.04
6	303.16	302.39	300.81	301.35
7	261.61	261.13	259.43	260.27
8	243.49	243.21	241.86	242.79
9	230.69	230.59	229.18	230.06
10	233.69	233.61	232.46	233.22
11	235.56	235.5	234.37	235.05
12	246.36	246.23	245.61	246.06

14. Saluran 1-2 dinamis dengan *energy storage* sistem IEEE 14 bus

Jam Ke-	Kondisi Normal		Kondisi Kontingensi	
	If(A)	It(A)	If(A)	It(A)
1	527.09	523.7	538.6	534.77
2	533.13	530.74	540.15	536.4
3	481.96	480.19	484.27	481.12
4	429.51	428.13	428.05	426.61
5	379.39	378.32	377.61	376.88
6	335.26	334.47	333.63	333.61
7	296.45	295.93	294.86	295.09
8	279.26	278.89	278.06	278.36
9	265.2	264.94	263.98	264.32
10	265.3	265.04	264.35	264.49
11	263.85	263.59	262.87	262.95
12	272.65	272.31	272.05	271.96

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Sidoarjo pada tanggal 16 April 1996. Penulis menempuh pendidikan dasar di MI Darul Muta'allimin Sidoarjo pada periode 2002-2008. Penulis kemudian melanjutkan sekolah di SMP YPM 1 Taman pada periode 2008-2011 dan melanjutkan ke SMAN 1 Taman pada periode 2011-2014. Pada tahun 2014 penulis melanjutkan studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro. Bidang studi yang diambil penulis yaitu teknik sistem tenaga.

Penulis aktif dalam ormaywa di ITS. Pada periode 2015-2016 penulis menjabat sebagai staff dept. Prokesma di HIMATEKTRO ITS dan pada periode 2016-2017 penulis menjabat sebagai kabiro finansial kesehatan di dept. Kesma HIMATEKTRO ITS. Selain aktif dalam ormaywa, penulis juga aktif dalam kegiatan kerohanian dan menjadi bagian dari LDJ di dept. Teknik Elektro pada periode 2015-2017. Penulis juga merupakan tentor di sebuah LBB yang bertempat di daerah Sidoarjo. Penulis dapat dihubungi di nomor 087752848988 atau melalui email [agungrochmadi16@gmail.com](mailto:agungrochmadi16@gmail.com).